

Remarcabilă invenţie a zilelor noastre, laserul suscită nu numai interesul omului de ştiinţă, ci şi pe cel al multor altor oameni. S-au scris şi se vor mai scrie încă multe cărţi despre laseri, pretutindeni în lume. Ziarele şi revistele publică adesea scurte notiţe despre noi aplicaţii şi realizări ale laserului. Puţine dintre acestea capătă semnificaţii corecte în mintea cititorului neavizat. De aceea, cartea de faţă îşi propune să dea o imagine onestă a ceea ce este şi poate să facă un laser.

Editura ştiinţifică şi enciclopedică

Lei 2,60



DAN APOSTOL

Laserii



Buzău, 8 iunie 1978
Stete

Unități de măsură; multipli și submultipli

1. Unitatea de măsură pentru lungime: metrul (m);

   1 m = 100 cm = 1 000 mm
   1 micrometru = 1 μm = 1/1 000 000 m = 10^{-6} m
   1 nanometru = 1 nm = 1/1 000 000 000 m = 10^{-9} m
   1 Ångstrom = 1 Å = 1/10 000 000 000 m = 10^{-10} m

2. Unitatea de măsură a timpului: secunda (s);

   1 milisecundă = 1/1 000 s = 10^{-3} s
   1 microsecundă = 1/1 000 000 s = 10^{-6} s
   1 nanosecundă = 1/1 000 000 000 s = 10^{-9} s
   1 picosecundă = 1/1 000 000 000 000 s = 10^{-12} s

3. Unitatea de măsură pentru energie: joulul (J);

   1 Joule = 1000 mJ = 1 000 000 μJ
   1 kJ = 1000 J

4. Unitatea de măsură pentru putere: wattul (W);

   1 watt = 1000 mW = 1 000 000 μW
   1 kW = 1000 W

5. Unitatea de măsură a frecvenței: hertzul (Hz);

   1 Hz = 1 oscilație / secundă
   1 kHz = 1000 Hz = 10^3 Hz
   1 MHz = 1 000 000 Hz = 10^6 Hz

1. PRINCIPIILE FUNCȚIONĂRII LASERILOR

1.1. Istoric

În mod inevitabil, o carte despre laseri începe prin explicarea termenului LASER. Originea sa vine de la inițialele cuvintelor *L*ight *A*mplification by *S*timulated *E*mission of *R*adiation sau în traducere amplificarea luminii prin emisia stimulată a radiației. Astfel, numele definește principiul: lumina laser este lumină amplificată printr-un proces fizic, enunțat de Einstein încă în anul 1917, procesul de emisie stimulată a luminii.

Ideea amplificării prin intermediul emisiei stimulate a fost preconizată de mai mulți cercetători printre care J. Webber, N. G. Basov, A. M. Prohorov, Ch. Townes.

Primul dispozitiv amplificator a fost realizat de Ch. Townes în 1951. Mediul amplificator era amoniacul, iar radiația amplificată prin procesul emisiei stimulate avea lungimea de undă de aproximativ 1,25 cm, deci făcea parte din domeniul *microundelor*. A apărut astfel MASER-ul.

Mai tîrziu, în 1958, A. L. Schawlow și C. H. Townes au sugerat posibilitatea utilizării aceluiași fenomen de emisie stimulată la amplificarea luminii, propunînd folosirea unei cavități rezonante deschise, formată din două oglinzi față în față, între care se află mediul amplificator stimulat să emită. Înlocuind inițiala cuvîntului microundă cu inițiala cuvîntului lumină s-a ob-

ținut LASER; de la apariția termenului și pînă la apariția obiectului fizic astfel denumit au mai trecut doi ani.

În 1960 T. H. Maiman de la Laboratoarele de cercetări Hughes (S.U.A.) a obținut pentru prima dată lumină laser sub forma unui puls de scurtă durată de lumină roșie. Mediul activ era format dintr-o bară de cristal de rubin. Primul laser capabil să emită în mod continuu a fost obținut în 1961 de A. Javan, W. R. Bennett Jr. și D. R. Herriot în laboratoarele Bell Telephone din S.U.A. Laserul construit de ei emitea un fascicul de lumină infraroșie ($\lambda = 11\,523$ Å) produs prin excitarea unui amestec de heliu și neon. Doi ani mai tîrziu, în 1962, același amestec de gaze producea un fascicul laser continuu de lumină roșie ($\lambda = 6\,328$ Å), rezultat obținut de A. D. White și J. D. Rigden.

Anul 1962 marchează apariția laserului cu semiconductori, în 1963 apărînd primul laser cu mediu activ lichid, iar în 1964 fiind construit primul laser chimic și primul laser molecular cu CO_2.

În 1966 P. P. Sorokin de la laboratoarele I. B. M. raportează apariția laserului cu colorant și istoria laserilor continuă și azi.

Se poate vorbi de cîteva mii de linii laser, emise de o mare varietate de medii active, în condiții dintre cele mai diferite de excitare și într-o gamă foarte bogată de puteri și lungimi de undă.

Desigur, din această multitudine de laseri cîțiva s-au impus prin calitățile luminii emise și prin varietatea și importanța aplicațiilor. La acești laseri ne vom referi în cele ce urmează.

1.2. Emisia stimulată și laserii

Pentru a înțelege mecanismul prin care laserii ajung să emită lumină să considerăm pe scurt fenomenele

care au loc într-o banală reclamă luminoasă. După cum se știe, reclamele sînt formate din tuburi de sticlă umplute cu gaze nobile, de tipul neonului, la presiune joasă de numai cîțiva milimetri coloană de mercur. La capetele tubului se aplică, prin doi electrozi, o tensiune electrică ridicată. Această tensiune provoacă apariția unui curent electric însoțit de o emisie luminoasă binecunoscută.

Spre deosebire de becul cu filament incandescent, tubul cu gaz este practic rece. Pe de altă parte, în timp ce filamentul incandescent emite o lumină albă, tubul de descărcare al reclamei emite o culoare specifică gazului din interior.

O experiență mai de finețe ne permite să facem o distincție mai profundă. Să lăsăm lumina emisă de cele două surse luminoase, filamentul incandescent și tubul de descărcare, să treacă, separat, printr-o prismă de sticlă (fig. 1). După cum se știe, prisma are proprietatea de a descompune lumina în culorile componente. Lumina becului cu filament incandescent, lumină albă, va fi descompusă în toate cele șapte culori ale curcubeu-

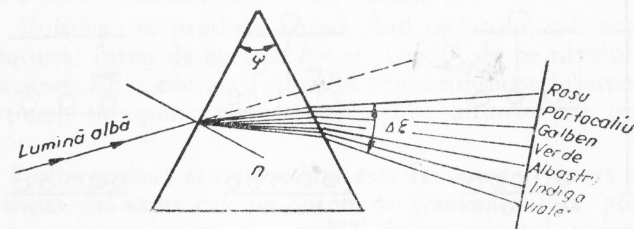


Fig. 1. Descompunerea luminii albe la trecerea printr-o prismă de sticlă

lui: roșu, portocaliu, galben, verde, albastru, indigo și violet. Între culori nu există zone marcate de trecere. Se spune că emisia se face în benzi continue, sau că

spectrul luminii emise de filamentul incandescent este un spectru continuu. În schimb, lumina tubului de descărcare va prezenta, după trecerea prin prismă, un spectru format din largi zone întunecoase și un număr limitat de zone înguste, distincte, de culori diferite. Una sau mai multe din aceste zone, sau linii spectrale, luminoase este mai intensă și impune culoarea caracteristică dominantă a descărcării. Configurația distinctă de linii luminoase astfel obținută este o caracteristică a gazului respectiv și se numește spectru discret.

Această particularitate a spectrului gazelor sugerează că explicația fenomenului se bazează pe existența unor nivele de energie distincte, bine definite, discrete, pe care se poate situa un atom. Într-adevăr, se știe că energia unui atom nu poate lua decît un set discontinuu de valori E_0, E_1, E_2, ... E_i, E_j ... E_n (fig. 2).

Înainte de aprinderea tubului, atomii neexcitați, au de regulă energia cea mai joasă, se află deci pe nivelul

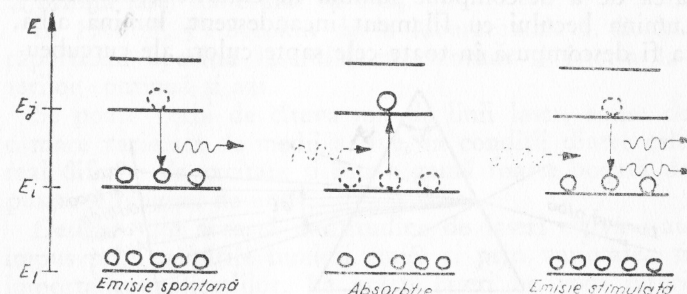


Fig. 2. Schema tranzițiilor unui atom între două nivele energetice E_i și E_j

de energie fundamentală, E_0. Efectul curentului electric, care furnizează energie gazului, este că repartizează atomi și pe nivelele de energie superioare. O linie luminoasă din spectrul gazului corespunde unei treceri a atomului respectiv de pe un nivel excitat superior, pe un nivel inferior, adică unei reveniri a atomului în starea de echilibru, în starea de energie minimă. Astfel fenomenul de producere a luminii este intim legat de tranzițiile atomilor de pe un nivel energetic pe altul.

Tranzițiile atomice sînt de mai multe feluri.

Emisia spontană se produce atunci cînd atomul „cade" de pe un nivel energetic superior, E_j, pe un nivel energetic inferior, E_i, emițînd o cantitate de lumină, o cuantă de lumină sau un foton, purtătoare a diferenței de energie dintre cele două nivele energetice. Frecvența acestui foton este

$$\nu = (E_j - E_i)/h, \qquad (1)$$

unde h este constanta lui Plank, egală cu $6{,}625 \cdot 10^{-34}$ J.s. Tranzițiile spontane se produc la momente de timp întîmplătoare. Nu există nici o corelație între fotonul emis de un atom dat și alt foton emis mai tîrziu de un alt atom. De aici numele de emisie spontană a fenomenului de emisie a luminii prin acest mecanism.

Absorbția se produce atunci cînd un atom, sub acțiunea unui foton de energie $h\nu_{ij}$, „urcă" de pe nivelul E_i pe nivelul E_j, energia fotonului consumîndu-se în această acțiune. Se spune că fotonul a fost absorbit de către atom.

Emisia indusă sau *stimulată* este fenomenul invers absorbției. În acest caz un foton de frecvență ν_{ij} poate determina un atom să „cadă" de pe nivelul superior E_j pe nivelul E_i. Atomul este astfel „împins", *stimulat* să emită un foton. Caracteristic acestui fenomen este faptul că fotonul emis stimulat are exact aceleași caracteristici cu fotonul inductor. Există deci o corelație între fotonul indus și fotonul inductor. În condiții normale, cum ar fi cele din reclama luminoasă cu neon,

primul fenomen, cel de emisie spontană, este dominant, iar în cazul laserului emisia stimulată predomină mult față de celelalte două fenomene. Iată deci diferența fundamentală dintre mecanismele de producere ale luminii „obișnuite" și luminii laser.

Rezultă așadar că e nevoie de niște condiții anormale pentru a asigura preponderența luminii emise stimulat asupra luminii emise spontan. Într-adevăr, pentru a obține lumină laser e nevoie ca pe nivelul superior E_j să avem mult mai mulți atomi decît pe nivelul inferior E_i. Se spune că nivelul E_i trebuie să fie mai populat decît nivelul E_j sau că trebuie să se realizeze o inversie de populație între cele două nivele. Aceasta este o situație anormală, tendința atomilor fiind de a se situa pe stări de energie cît mai coborîte. Este deci nevoie de un mecanism prin care atomii să fie pompați pe nivelul superior.

Pompajul se face electric, fotonic sau chimic și constă în a furniza atomilor energia necesară pentru a trece în starea energetică superioară.

Odată realizată inversia de populație e nevoie de cîțiva fotoni de frecvență ν_{ij} care să determine emisia forțată a atomilor de pe nivelul E_j. Un astfel de foton inductor poate fi emis spontan chiar de unul dintre atomii în cauză. El va induce emisia unui alt foton cu aceleași caracteristici ca și ale lui, acești doi fotoni vor induce producerea altor doi și tot așa procesul continuă. Fotonul singular inițial este multiplicat, amplificat de nenumărate ori. Pentru ca procesul să nu se stingă este nevoie, pe de o parte, ca mecanismul de pompaj să furnizeze continuu energie atomilor mediului activ laser, iar pe de altă parte, să se utilizeze o cavitate rezonantă.

O cavitate rezonantă laser este în general formată din două oglinzi față în față. Între aceste două oglinzi fotonii sînt reflectați și obligați să parcurgă de mai multe ori mediul activ, la fiecare trecere fiecare foton producînd o avalanșă de fotoni asemenea lui.

Procesul de amplificare nu este nelimitat. Oglinzile cavității rezonante nu reflectă total. Una dintre ele este puțin transparentă, permițînd luminii amplificate să iasă sub forma unui fascicul îngust și foarte intens. Astfel se ajunge la un echilibru între amplificare și pierderi, care limitează procesul de amplificare.

1.3. Funcționarea laserului cu rubin

După cum am văzut, un laser trebuie să cuprindă un mediu activ amplificator (gazos, lichid, sau solid), un mecanism de pompaj (sistem de excitare) și o cavitate rezonantă.

Vom lua ca exemplu laserul cu rubin, primul în ordine cronologică. Mediul activ este format dintr-o bară de rubin roz sau corindon (Al_2O_3), dopat cu aproximativ 0,05% ioni de crom Cr^{+++}. Ionul de crom înlocuiește ionul de aluminiu Al^{+++} în rețeaua cristalului și între două nivele energetice ale ionului de crom trebuie produsă inversia de populație.

Pompajul se face cu ajutorul unei lămpi de descărcare de tipul fulger (blitz), cunoscută din tehnica fotografică (fig. 3).

Deoarece pompajul se face cu ajutorul luminii, este vorba de un pompaj fotonic, iar fenomenul implicat este absorbția luminii.

Cavitatea rezonantă cuprinde două oglinzi față în față între care se află bara de rubin transparentă. Oglinzile reflectă bine numai fotoni de o anumită frecvență, corespunzătoare tranziției implicate în procesul de emisie stimulată și deci numai aceștia sînt amplificați. Se obține astfel o lumină laser sub forma unui fascicul îngust de culoare roșie, de lungime de undă 6943 Å, deosebit de intens.

Deoarece mecanismul de pompaj nu durează decît cîteva miimi de secundă, inversia de populaţie nu se poate menţine mai mult de atît. Rezultă deci un puls laser foarte scurt.

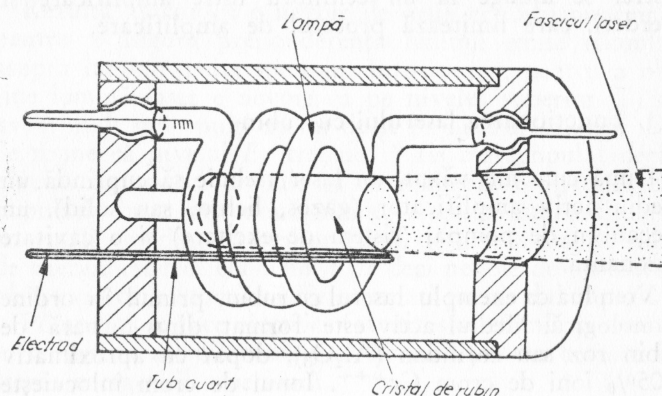


Fig. 3. Schema unui laser cu rubin.

În concluzie, laserul cu rubin este un laser cu mediu activ solid, pompat fotonic, care funcţionează în impulsuri. El emite un fascicul de lumină roşie de durată scurtă, de mare intensitate şi cu proprietăţi remarcabile.

2. PROPRIETĂŢILE LUMINII LASER

Laserul este, după cum am văzut, o sursă de lumină. În acest capitol ne propunem să evidenţiem diferenţele specifice ale luminii laser faţă de lumina emisă de alte surse. Prin ce este lumina laser deosebită de lumina naturală?

Pentru aceasta vom trece în revistă principalele sale proprietăţi: monocromaticitatea, direcţionalitatea, coerenţa şi intensitatea. Înţelegerea acestor proprietăţi ne va permite o înţelegere corectă a fenomenului laser şi o dezvoltare uşoară a capitolului de aplicaţii ale laserilor.

2.1. Monocromaticitatea

Termenul se referă la culoare; o sursă de lumină care emite lumină de o singură culoare se numeşte sursă de lumină monocromatică. Astfel, geamurile colorate ale lampadarelor transformă lumina albă a becurilor în lumină de o singură culoare, absorbind celelalte culori.

Nu pare deci greu să obţinem lumină monocromatică, atît timp cît ne referim numai calitativ la acest subiect. Problema este cît de monocromatică trebuie să fie lumina obţinută?

După cum am arătat în primul capitol, cu ajutorul unei prisme putem descompune lumina albă în cele şapte culori ale curcubeului. Trecerea de la o culoare la alta nu se face însă brusc, ci printr-o infinitate de nuanţe. Culoarea este numai reacţia ochiului la lumina de o anumită lungime de undă.* Ochiul este sensibil numai la lumina cu lungimea de undă cuprinsă între 0,4 μm şi 0,8 μm. Între aceste două lungimi de undă sînt cuprinse cele şapte culori ale curcubeului, delimitate aproximativ în tabelul 1.

Tabelul 1

Culoarea luminii	Intervalul aproximativ de lungimi de undă λ [μm]	Culoarea luminii	Intervalul aproximativ de lungimi de undă λ [μm]
Roşu	0,76–0,63	Verde-albastru	0,50–0,45
Portocaliu	0,63–0,60	Albastru	0,45–0,43
Galben	0,60–0,57	Violet	0,43–0,40
Verde	0,57–0,50		

Se vede astfel că lumina roşie înseamnă un interval de lungimi de undă $\Delta\lambda = 1\,300$ Å şi acesta este intervalul de lumină roşie emis de Soare sau de un bec cu filament incandescent. În cazul descărcărilor în gaze, intervalul de lungimi de undă pe care se emite o culoare este cu mult mai mic. Am arătat că lumina apare ca urmare a tranziţiilor atomilor de pe un nivel energetic superior pe un nivel energetic inferior. Cînd aceste nivele de energie sînt perfect definite, lumina emisă este

* Lungimea de undă este spaţiul parcurs de oscilaţia luminoasă în timpul unei perioade şi se notează cu λ. Între lungimea de undă λ şi frecvenţa ν există relaţia $\lambda = \frac{c}{\nu}$; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s = viteza luminii.

formată din fotoni de frecvenţă bine determinată prin formula (1), din secţiunea 1. La trecerea printr-o prismă se separă fotoni de frecvenţe diferite, obţinîndu-se raze monocromatice. În realitate, nivelele energetice ale atomilor nu sînt perfect determinate şi astfel nu se obţine lumină ideal monocromatică. Din cauza unor procese intime ale materiei la nivel atomic, cum ar fi influenţele reciproce dintre atomi, deplasarea relativă a atomilor unii faţă de alţii, legăturile dintre atomi, nivelele de energie se lărgesc şi lumina emisă se încadrează într-o bandă Δλ de lungimi de undă. De la gaze la lichide şi solide banda de emisie a tranziţiilor radiative creşte continuu, ajungînd să ocupe tot spectrul în cazul filamentului incandescent.

În cazul gazelor, lărgimea de bandă de emisie a unei radiaţii luminoase poate atinge valori foarte mici. Astfel, lumina verde emisă de vaporii de mercur are o lărgime de bandă de numai $\Delta\lambda = 20$ Å în jurul lungimii de undă de 5 461 Å. Cu anumite precauţii, această lărgime de bandă poate fi coborîtă pînă la fracţiuni de Ångstrom pentru anumite gaze.

Laserul cu heliu şi neon poate însă să emită lumină într-un interval de numai 0,001 Å! Cum e posibil acest lucru?

S-ar părea că explicaţia este dată tot de fenomenul emisiei stimulate. Într-adevăr, emisia stimulată impune condiţia ca fotonii stimulaţi să posede aceleaşi caracteristici cu fotonii inductori. Dacă ne amintim însă că fotonii stimulatori sînt la început fotoni de tip spontan, deci care ocupă întreaga lărgime a nivelelor energetice, vedem că nu acesta este motivul.

Adevărata explicaţie este dată de prezenţa cavităţii rezonante. După cum îi spune şi numele, cavitatea rezonantă „răsună“ asemeni cutiei unei viori sau tubului de orgă la anumite frecvenţe. Altfel spus, din lărgimea

tranziţiei naturale, cavitatea rezonantă selectează anumite frecvenţe, care îi sînt proprii şi pe care le lasă să oscileze şi să se amplifice (fig. 4).

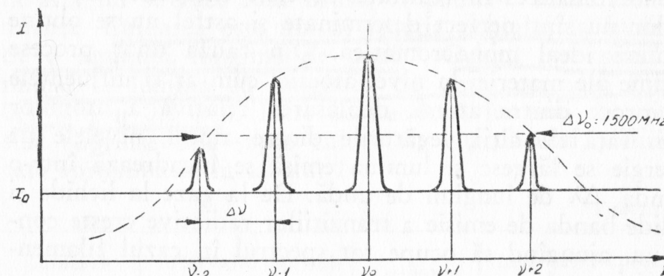


Fig. 4. Lărgimea benzii de emisie a tranziţiei normale (linia întreruptă) şi a tranziţiei laser (linia plină).

Distanţa dintre două astfel de frecvenţe proprii, sau moduri, exprimată în hertzi este

$$\Delta\nu_i = \nu_{i+1} - \nu_i = \frac{c}{2l},$$

unde l este distanţa dintre oglinzile cavităţii rezonante, iar c viteza luminii.

În cazul laserului cu heliu şi neon lărgimea totală naturală a luminii descărcării (neonului) este de 1 500 MHz. Pentru un laser de acest tip, cu o cavitate lungă de 1 m şi viteza luminii c = 300 000 km/s, obţinem între modurile proprii de oscilaţie ale cavităţii rezonante un interval

$$\Delta\nu_i = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 300 \text{ MHz},$$

(1 MHz = 1 000 000 Hz) deci numărul de frecvenţe proprii acceptate de cavitatea rezonantă va fi cinci.

Dacă micşorăm lungimea cavităţii rezonante pînă la 20 cm obţinem

$$\Delta\nu_i = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{0{,}2 \text{ m}} = 1\,500 \text{ MHz},$$

în care caz laserul va putea oscila pe o singură frecvenţă în limitele lărgimii naturale a tranziţiei (fig. 5).

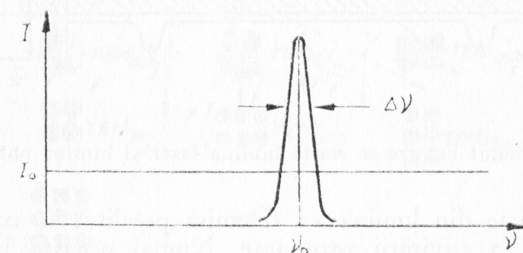


Fig. 5. Laser monofrecvenţă; $\Delta\nu = 100$ MHz ($\Delta\lambda = 0{,}001$ Å).

Lărgimea acestei unice frecvenţe laser este de numai 0,001 Å în condiţiile în care lungimea cavităţii rezonante este menţinută constantă în limite foarte strînse.

2.2. Direcţionalitatea

Direcţionalitatea este proprietatea laserului de a emite lumină într-o singură direcţie. Sursele clasice de lumină, becul cu filament incandescent sau descărcările electrice în gaze, emit lumină în toate direcţiile, într-un mod mai mult sau mai puţin uniform.

Explicaţia direcţionalităţii laserului este următoarea. Ne referim la figura 6 care prezintă un tub de descărcare în gaze aşezat într-o cavitate rezonantă formată

din două oglinzi paralele una față de alta și perpendiculare pe axa tubului. În tubul de descărcare se găsește mediul activ gazos. Pompat electric, mediul activ va emite lumină în mod spontan în toate direcțiile. O

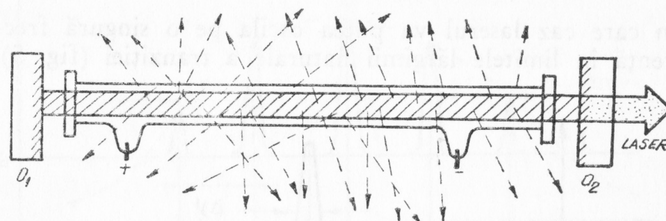


Fig. 6. Modul în care se emite lumina laser și lumina obișnuită.

mică parte din lumină va fi emisă pe direcția axei tubului și a cavității rezonante. Numai această lumină va fi amplificată puternic prin procesul de emisie stimulată întreținut de reflexiile multiple între oglinzile cavității rezonante. Prin emisie stimulată se emit fotoni care se propagă în aceeași direcție și sens cu fotonii stimulatori. Vedem deci că emisia stimulată se desfășoară eficient numai în lungul axei tubului.

Un foton care nu se propagă după această axă este pierdut pentru laser, în timp ce un foton care se propagă cît mai aproape de direcția axei tubului este puternic amplificat.

Iată de ce lumina laser se propagă într-o singură direcție. Am arătat în capitolul precedent că pentru ca lumina laser să iasă din cavitatea rezonantă, una dintre oglinzi are o oarecare transmisie. Astfel, dacă una dintre oglinzi reflectă tot, coeficientul ei de reflexie fiind foarte aproape de sută la sută ($R=99{,}8\%$ practic) cea de a doua oglindă, numită și oglindă de extracție, care

permite „ieșirea" fasciculului laser din capcana cavității rezonante reflectă mai puțin cu cîteva procente ($R=97—98\%$). Se obține astfel un fascicul laser îngust și paralel care poate fi observat pe un paravan.

Am văzut că laserul poate să oscileze — funcție de frecvențele de rezonanță ale cavității rezonante — după mai multe frecvențe apropiate numite și moduri longitudinale. În realitate, există și o structură transversală.

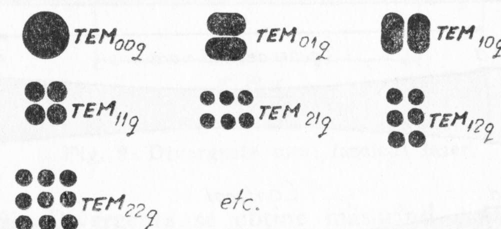


Fig. 7. Structuri modale transversale ale fasciculelor laser.

Într-adevăr, observînd fasciculul roșu, vizibil, al laserului cu heliu și neon, pe un paravan s-ar putea să vedem o structură transversală sau mod transversal. Aceste moduri pot avea forme de genul celor din figura 7.

Apariția acestor moduri transversale de oscilație este legată de forma cavității rezonante și poate fi modificată ușor prin modificarea poziției relative a celor două oglinzi. Oglinzile cavității rezonante pot fi plane sau sferice și se pot combina în configurațiile din figura 8.

Pentru primele două configurații se cere o stabilitate mecanică foarte bună și o mare precizie de aliniere a oglinzilor. Celelalte configurații se aliniază și se mențin mai bine, în schimb favorizează apariția unor moduri de oscilație transversale complicate și de divergență mare.

Pentru o direcţionalitate bună se preferă o cavitate cu raze mari de curbură care oscilează în modul $TEM_{[00q]}$ şi care în acelaşi timp implică un volum mai mare din mediul activ în procesul de emisie stimulată (vezi fig. 8).

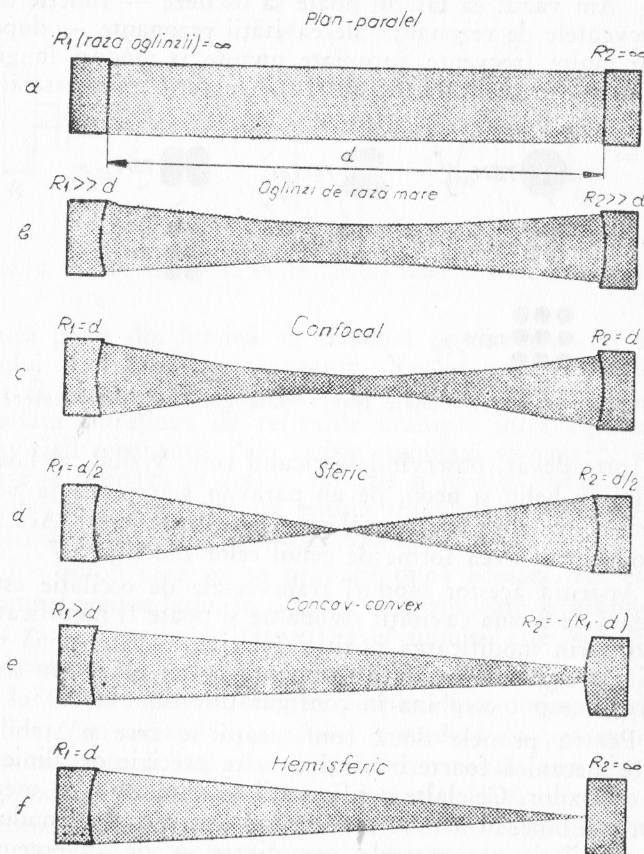


Fig. 8. Configuraţii posibile de cavităţi rezonante.

Vom caracteriza direcţionalitatea prin mărimea numită divergenţă, pe care o vom defini simplu ca fiind creşterea razei (transversale) a fasciculului laser cu distanţa

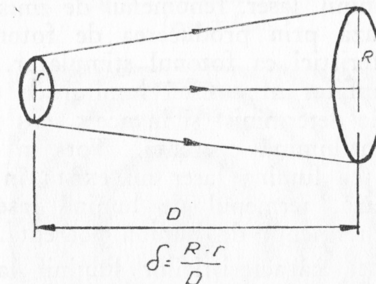


Fig. 9. Divergenţa unui fascicul laser.

(fig. 9). Divergenţa se obţine măsurînd raza fasciculului laser la ieşire şi la o distanţă cunoscută. Divergenţa tipică pentru laserul cu heliu şi neon este de 10^{-3} radiani, ceea ce înseamnă că dacă trimitem un fascicul laser de 1 mm rază la ieşire, la 100 m distanţă şi măsurăm raza petei laser pe un paravan, obţinem (fig. 9)

$$R = r + \delta D \simeq \delta D = 100 \text{ m} \cdot 10^{-3} \text{ radiani} = 0{,}1 \text{ m}.$$

Pentru laserii cu corp solid ca mediu activ, divergenţa este mult mai mare, ajungînd la valori de ordinul gradelor pentru laserul cu semiconductor.

2.3. Coerenţa

Lumina coerentă este lumina formată din fotoni coerenţi, adică fotoni între care există o legătură, o relaţie.

Fotonii emişi de atomii filamentului incandescent nu sînt coerenţi, în sensul că fiecare atom emite în mod

spontan, la un moment oarecare, într-o direcţie oarecare cu o frecvenţă aleatorie şi fără legătură cu alt atom.

În cazul luminii laser, fenomenul de emisie stimulată se caracterizează prin producerea de fotoni cu exact aceleaşi caracteristici ca fotonul stimulator. Astfel, caracterul întîmplător al emisiei luminii de către atomi devine puternic determinist şi în acest sens prin lumină laser înţelegem lumină coerentă. Tot în acest sens putem afirma că lumina laser nu există în natură. În cele ce urmează, termenul de lumină laser poate fi confundat cu termenul de lumină coerentă.

Staţionaritatea caracteristicilor luminii laser — fenomen oscilatoriu cu frecvenţa enormă de 10^{15} Hz — este cu totul remarcabilă. Ea se pune în evidenţă prin fenomenul de interferenţă, fenomen de compunere a oscilaţiilor în general (luminoase, acustice etc.). În general, prin suprapunerea a două fascicule luminoase se obţine o iluminare mai puternică. Exemplul aprinderii pe rînd a mai multor becuri într-o încăpere este elocvent. Exemplul este valabil pentru surse incoerente. În cazul suprapunerii a două fascicule coerente nu se mai obţine o iluminare uniformă, ci o serie de minime şi maxime luminoase, numite franje de interferenţă. Forma şi intervalul dintre aceste minime sau maxime de iluminare depinde de unghiul dintre cele două fascicule şi de forma lor. Cînd unghiul este foarte mic şi forma apropiată, franjele pot fi văzute cu ochiul liber (fig. 10).

Şi fasciculele incoerente se compun, dar caracteristicile lor nefiind staţionare, figura de interferenţă se schimbă extrem de rapid şi nu poate fi observată.

Gradul de coerenţă al unei surse luminoase se caracterizează prin calitatea (contrastul) franjelor de interferenţă care se obţin într-o experienţă de interferenţă.

Pentru aceasta, Michelson a introdus mărimea numită vizibilitate

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}},$$

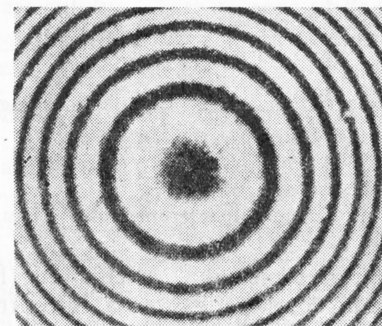


Fig. 10. Inele Newton; franje de interferenţă obţinute din compunerea unei unde laser plane cu o undă sferică.

unde I_{max} şi I_{min} sînt valorile maxime şi minime ale intensităţii din figura de interferenţă. În figura 10, $I_{min}=0$ şi vizibilitatea V ia valoarea maximă. Pentru o sursă complet incoerentă, $I_{max} = I_{min}$, adică nu avem franje de interferenţă şi $V = 0$. Franjele de interferenţă se obţin cu ajutorul interferometrelor.

Acestea sînt aparate care realizează divizarea fasciculelor laser în două fascicule pe care le suprapun apoi la unghiuri mici pentru a se putea observa franjele. Desigur două fascicule de la doi laseri diferiţi nu pot fi coerente unul faţă de celălalt şi nu pot da figuri de interferenţă staţionare. Iată de ce e nevoie de divizarea fasciculului luminos în două fascicule coerente, unul în raport cu celălalt. Există două tipuri de interferometre: Young şi Michelson.

Interferometrul Young pune în evidență corelația existentă la un moment dat între două puncte diferite ale frontului de undă (figura 11).

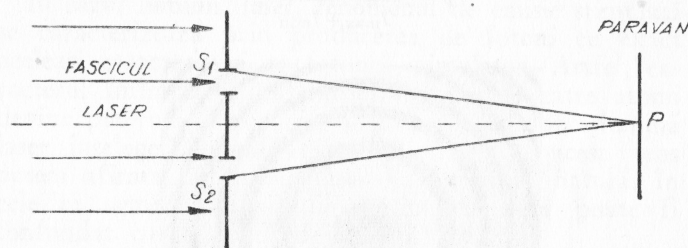


Fig. 11. Schema interferometrului Young.

În cadrul interferometrului Michelson (fig. 12) se pune în evidență corelația existentă între fotonii fascicului în același punct, dar la momente de timp diferite. Primul caz se referă la coerența spațială, al doilea la coerența temporală.

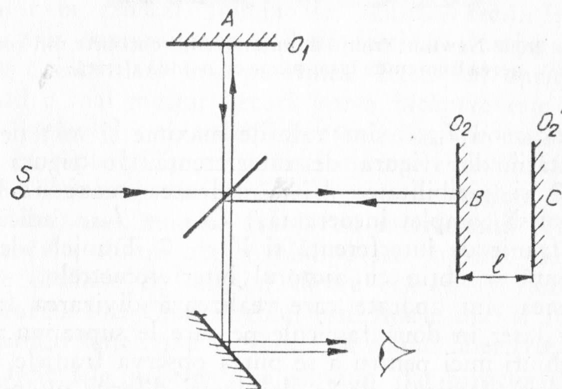


Fig. 12. Interferometrul Michelson.

În experiența lui Young, pe măsură ce cele două fante, S_1 și S_2, se îndepărtează, vizibilitatea franjelor scade ajungînd la zero. Distanța maximă dintre surse, pentru care mai avem franje de interferență în punctul de observație, definește zona de coerență spațială pe secțiunea fasciculului. Această zonă tinde la zero pentru sursele incoerente și acoperă toată secțiunea fasciculului pentru laserul cu heliu-neon.

În experiența Michelson, pe măsură ce oglinda O_1 se depărtează, vizibilitatea V a franjelor scade de la 1 cînd $OA=OB$, ajungînd la zero cu atît mai repede cu cît sursa este mai incoerentă temporal. Michelson a observat că cu cît sursa este mai monocromatică cu atît distanța pe care vizibilitatea scade la zero este mai mare. Astfel, lungimea de coerență temporală, cum este denumită această distanță, este invers proporțională cu lărgimea de bandă $\Delta\lambda$ pe care emite sursa.

Cazul cel mai fericit de sursă clasică coerentă este o descărcare electrică în kripton izotopic pur (Kr^{86}) pentru care lungimea de coerență ajunge la cîteva zeci de centimetri, dar pentru o intensitate extrem de scăzută. Laserii cu gaz de tipul celui cu heliu și neon ating însă lungimi de coerență de ordinul zecilor de metri la intensități apreciabile.

Nu întotdeauna avem la îndemînă un interferometru pentru a caracteriza proprietatea de coerență a luminii laser.

Există însă un fenomen care ne permite la simpla examinare vizuală să punem în evidență proprietatea de coerență a luminii laser. Este vorba de fenomenul de granularitate. Privind pata laser pe un paravan vom observa un aspect mătăsos, granular, discontinuu al iluminării laser. Mai mult, schimbînd unghiul de vedere,

granulaţia se deplasează, iar dacă strîngem din ochi granulele se măresc.

Proprietatea de granulaţie nu apare decît după iluminarea unei scene. Ea nu este proprie fasciculului laser. Explicaţia este legată de coerenţa luminii laser şi de rugozitatea suprafeţelor iluminate. Scena iluminată difuzează lumina către ochiul observatorului. Astfel, două raze difuzate de două puncte apropiate ale obiectului iluminat interferă şi produc minime şi maxime de interferenţă. Acelaşi lucru are loc pentru oricare două raze, ceea ce explică apariţia unei structuri aleatorii de franje, aspectul total fiind de granulaţie. Cînd strîngem din ochi, deci cînd micşorăm suprafaţa de recepţie a ochiului, numai razele care fac un unghi mic între ele pătrund în ochi, iar franjele se măresc cînd unghiul dintre fasciculele care interferă se micşorează, deci mărimea granulelor creşte.

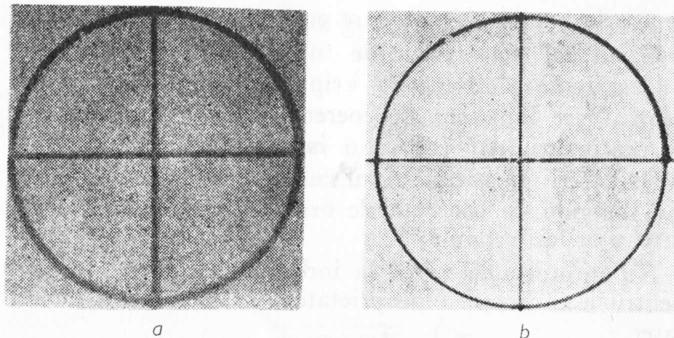


Fig. 13. Fotografia unui obiect: a) în lumină coerentă şi b) în lumină incoerentă.

În figura 13 sînt prezentate două fotografii ale aceluiaşi obiect în lumină incoerentă (bec cu filament incandescent) şi în lumina roşie a laserului cu He-Ne cu o diafragmă foarte mică ($f/22$).

2.4. Intensitatea

Intensitatea surselor laser este remarcabilă mai ales în măsura în care se asociază celorlalte proprietăţi.

Trebuie să facem distincţie de la bun început între energia şi puterea laserilor. Vom vedea în capitolul următor că există laseri care emit lumină în mod continuu sau numai pulsuri foarte scurte la intervale de timp destul de mari. În cazul laserilor care emit continuu ne vom referi numai la putere, adică la energia luminoasă emisă de aceşti laseri în unitatea de timp. Astfel, unităţile de măsură vor fi wattul, multiplii şi submultiplii săi. Astfel, laserul cu heliu-neon are puteri tipice cuprinse între 1 şi 100 mW, laserul cu argon ionizat merge de la 1,5 la 10 W, iar laserul cu bioxid de carbon ajunge la 1 KW.

Unităţile de putere sînt desigur valabile şi pentru laserii pulsaţi, folosirea lor este însă greoaie. Într-adevăr, un laser pulsat, care emite o energie de 0,1 jouli (unitate de energie) în numai 10^{-9} secunde (1/1 000 000 000 dintr-o secundă) ar avea puterea de

$$P\ (\text{puterea}) = \text{Energia}/t\ (\text{timp}) = 0{,}1\ \text{jouli}/10^{-9}\ \text{secunde};$$

$$P = 10^{8}\ \text{W} = 100\ 000\ \text{kW}.$$

Cifra este enormă şi poate induce în eroare. Pentru înţelegerea corectă a acestei valori să ne gîndim că într-o secundă de funcţionare continuă un laser cu heliu-neon de numai 100 mW emite o energie

$$E = P \cdot t = 0{,}1\ \text{W} \cdot 1\ \text{s} = 0{,}1\ \text{jouli},$$

adică tot atîta energie cît laserul de 100 000 kW în intervalul de timp foarte scurt cît durează pulsul laser. Ce putere luminoasă emite însă un bec cu filament incandescent de 100 W?

În primul rînd să ne gîndim la faptul că 100 W reprezintă consumul electric al becului și nu puterea luminoasă emisă.

Randamentul luminos, adică raportul dintre puterea luminoasă emisă și puterea electrică consumată îl vom considera în mod exagerat de 10%, adică un bec de 100 W emite de fapt numai 10 W putere luminoasă cuprinsă în domeniul spectral vizibil de aproximativ 3600 Å (vezi tabelul 1). Lumina becului este răspîndită aproape uniform în toate direcțiile. Să vedem cum se repartizează lumina becului pe o sferă cu raza de 1 m.

Suprafața sferei este $S=4\pi r^2=4\cdot 3{,}14\cdot 1\ m^2=12{,}56\ m^2$. Distribuind cei 10 W de lumină incoerentă emisă de filamentul incandescent pe această suprafață obținem $0{,}8\ W/m^2$.

Să comparăm această densitate de putere pe m^2 cu densitatea produsă de un laser cu heliu-neon de 1 mW, care emite un fascicul îngust de suprafață 1 mm^2 într-o singură direcție.

Densitatea de putere produsă de acest laser va fi

$$0{,}001\ W : 0{,}000001\ m^2=1000\ W/m^2,$$

deci laserul este — pînă acum — de 1250 de ori mai puternic decît becul de 100 W. Cifra este valabilă atît timp cît ne referim numai la direcționalitatea laserului. Să luăm în considerare și monocromaticitatea sa. Într-adevăr, domeniile spectrale pe care emit cele două surse sînt mult diferite. Becul emite pe un domeniu spectral de $\Delta\lambda_{bec}=3600$ Å, iar laserul $\Delta\lambda_{laser}=0{,}01$ Å în cazul unui laser cu heliu-neon tipic.

Presupunînd că becul emite în mod uniform aceeași putere pentru fiecare unitate de domeniu spectral, raportul puterilor între lumina emisă de laserul cu heliu-neon pe $\Delta\lambda_{laser}=0{,}01$ Å în jurul valorii $\lambda=6328$ Å și

puterea emisă de bec în același interval este invers proporțională cu raportul lărgimilor de bandă

$$\frac{\Delta\lambda_{bec}}{\Delta\lambda_{laser}}=\frac{3600\ Å}{0{,}01\ Å}=360\ 000.$$

În final, laserul va fi, pe domeniul său spectral și cu direcționalitatea sa, de

$$1250\cdot 360\ 000=440\ 000\ 000 \text{ ori}$$

mai puternic decît becul.

Am trecut în revistă principalele proprietăți ale luminii laser. Fiecare proprietate este remarcabilă în sine și în raport cu celelalte. În mare măsură, coerența, caracterul ordonat al luminii laser, este proprietatea care diferențiază laserul de celelalte surse de lumină. Iată de ce definiția corectă a laserului se reduce la aserțiunea: laserul este o sursă de lumină coerentă.

3. TIPURI DE LASERI

Criteriile de clasificare a laserilor pot fi regimul de emisie, tipul de pompaj, mediul activ, puterea, tipurile de aplicaţii etc. Am ales mediul activ şi am împărţit laserii nu în trei categorii, cum ar fi de aşteptat, ci în patru, tratînd laserii cu semiconductori separat de laserii cu corp solid din cauza unor diferenţe de principiu.

În clasificarea noastră, laserii sînt deci de patru feluri: laseri cu mediu activ solid, laseri cu semiconductori, laseri cu mediu activ lichid şi laseri cu gaz.

3.1. Laseri cu mediu activ solid

După apariţia primului laser — laserul cu rubin — a apărut o serie întreagă de laseri cu corp solid şi anume laseri cu ioni de uraniu şi de pămînturi rare. Printre aceştia, laserul cu neodim a căpătat o dezvoltare deosebită, alături de laserul cu rubin. De regulă atomii sau ionii activi sînt înglobaţi într-un material gazdă cum ar fi sticla în cazul ionului de neodim, rubinul în cazul ionului de crom sau fluorura de calciu pentru ionii de uraniu. Efectul laser are loc prin tranziţii între nivelele ionului cu care s-a dopat materialul gazdă. Materialele gazdă trebuie să fie foarte omogene, transparente la radiaţia laser şi să nu absoarbă din energia de pompaj.

Laserul cu rubin se distinge substanţial de laserii cu ioni de pămînturi rare, dintre care tipic este laserul cu neodim, prin numărul de nivele energetice implicate în procesul de obţinere a radiaţiei coerente. Laserul cu rubin funcţionează pe baza tranziţiilor între trei nivele, iar laserul cu neodim implică patru nivele de emisie ale ionului respectiv.

Diagrama nivelelor de energie ale laserului cu rubin, (figura 14) implică trei nivele energetice ale ionului de crom. Materialul activ, sub forma unei bare, este supus acţiunii unei lămpi fulger foarte intense, care produce tranziţiile ionilor de crom de pe nivelul fundamental 1 pe nivelul 3 excitat. Între nivelul 3 şi nivelul 2 are loc un foarte rapid transfer de energie neradiativ. Dacă pompajul fotonic cu lampa fulger este suficient de rapid, un număr foarte mare de ioni de crom vor fi excitaţi pe nivelul 2, astfel încît nivelul 2 va fi mai popu-

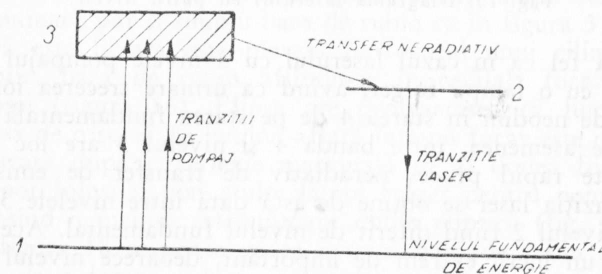


Fig. 14. Schema nivelelor energetice ale laserului cu rubin.

lat decît nivelul 1. Se obţine astfel inversia de populaţie necesară declanşării efectului laser. Prin reflexiile multiple între oglinzile cavităţii rezonante se menţine o densitate mare de fotoni coerenţi, care depăşeşte cu

mult densitatea fotonilor emişi spontan. Laserul va emite deci un fascicul de fotoni coerenţi de frecvenţă ν_{21}.

Diagrama laserului cu patru nivele este dată în figura 15.

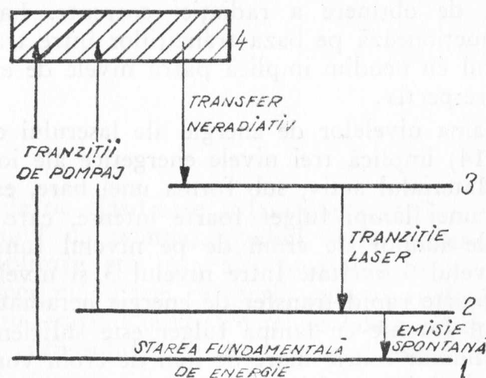


Fig. 15. Diagrama laserului cu patru nivele.

La fel ca în cazul laserului cu 3 nivele pompajul se face cu o lampă fulger, avînd ca urmare trecerea ionilor de neodim în starea 4 de pe starea fundamentală 1.

De asemenea, între banda 4 şi nivelul 3 are loc un foarte rapid proces neradiativ de transfer de emisie. Tranziţia laser se obţine de astă dată între nivelele 3 şi 2, nivelul 2 fiind diferit de nivelul fundamental. Acesta este un lucru extrem de important, deoarece nivelul 2, comparativ cu nivelul fundamental va fi întotdeauna mai puţin populat. Rezultă deci că inversia de populaţie între nivelele 3 şi 2 va fi cu mult mai pronunţată decît între nivelul pompat şi nivelul fundamental (în cazul laserului cu rubin între 2 şi 1), deci de aici posibilitatea laserilor cu patru nivele de a emite energii mult mai mari decît laserii cu trei nivele.

Elementele constructive sînt comune laserilor cu rubin şi neodim.

Pompajul se face cu o lampă fulger. Energia electrică de aprindere a lămpii este înmagazinată într-o baterie de condensatoare alimentată de o sursă de tensiune continuă în domeniul 2000—5000 V. Lampa fulger este umplută cu xenon şi nu se poate aprinde pînă cînd nu primeşte un puls electric de 15 000—20 000 V de la o bobină de inducţie. Pulsul electric adiţional de mică energie declanşează descărcarea luminoasă fulger de o foarte mare intensitate. Efectul laser se obţine în cavitatea rezonantă formată de două oglinzi faţă în faţă, care cuprind între ele bara de rubin, fasciculul ieşind prin oglinda parţial transparentă.

Pentru a obţine maximum de transfer de energie între lampa fulger şi bara de mediu activ, deci pentru ca o parte cît mai mare din lumina emisă de lampa fulger să ajungă la mediul activ, ansamblul bară-lampă se introduce într-un recipient cu pereţi puternic reflectători. Mai mult decît atît, în unele cazuri lampa fulger înconjoară pur şi simplu bara de rubin ca în figura 3 sau dacă este liniară este plasată în focarul unui cilindru eliptic, bara de rubin aflîndu-se în celălalt focar al elipsei (figura 16). Elipsa are proprietatea că lumina emisă de o sursă de lumină aflată într-un focar este concentrată după o reflexie marginală în al doilea focar. Se pot folosi şi mai multe lămpi fulger pentru pompaj folosind o incintă reflectătoare dublu eliptică (fig. 17). În figura 18 se poate vedea o mică bară de rubin alături de o lampă fulger, iar în figura 19 lampa fulger şi bara de rubin sînt montate într-o incintă eliptică.

Laserul pompat astfel trebuie neapărat răcit, deoarece lampa fulger produce multă căldură. În plus, efectul laser însuşi produce încălzirea mediului activ, acesta absorbind un procent mic din emisia laserului. Dacă energia laserului depăşeşte o anumită limită de

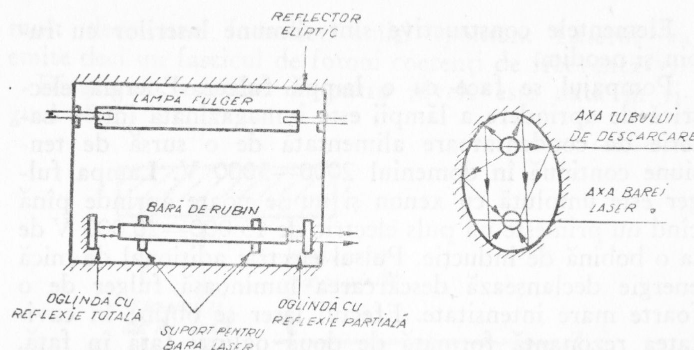


Fig. 16. Incinta unui laser pompat fotonic. Incinta este un cilindru eliptic în focarele căruia se află lampa fulger și bara de rubin. Se observă că razele de lumină emise de lampa fulger ajung, după reflexie pe cilindru, pe bara de rubin.

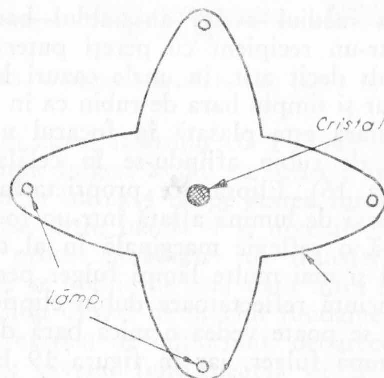


Fig. 17. Incintă reflectătoare multiplu eliptică.

prag, sau dacă coeficientul de absorbție al mediului activ este prea mare se poate produce distrugerea barei. Iată de ce se impune funcționarea în impulsuri a aces-

tor laseri. Din acest punct de vedere laserul cu sticlă dopată cu neodim este superior laserului cu rubin, pragul de distrugere al sticlei fiind mai ridicat decît

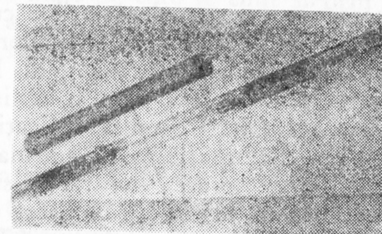


Fig. 18. Bară de rubin și lampă fulger.

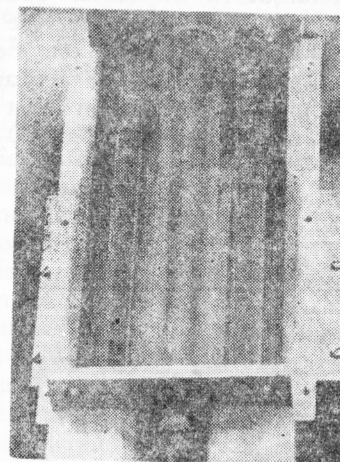


Fig. 19. Fotografia incintei dublu eliptice a unui laser cu rubin: În centru bara de rubin este înconjurată de un tub de sticlă prin care circulă lichidul de răcire; lateral se văd două lămpi fulger.

al cristalului de rubin. Alt material gazdă pentru ionul activ de neodim (granatul de itriu și aluminiu — YAG),

este atît de rezistent încît permite funcţionarea continuă a laserului cu neodim la lungimea de undă de 1,06 μ, emiţînd o putere de 1 kW.

Valorile energetice curente ale laserilor cu rubin sînt de ordinul zecilor de jouli iar ale laserilor cu neodim de ordinul sutelor şi chiar miilor de jouli. Pulsul luminos al lămpii fulger durează cam o milisecundă, iar pulsul laser cam tot atît. În multe aplicaţii cum ar fi găurire, sudare sau holografie şi în cinematografia rapidă este nevoie de micşorarea duratei pulsului, ceea ce implică mărirea puterii laserului. În acest scop, laserul nu trebuie lăsat să oscileze pînă cînd nu s-a atins prin pompaj maximum de inversie de populaţie. Laserul trebuie deci declanşat în momentul optim. Pentru a împiedica laserul să oscileze se intervine în cavitatea rezonantă. Metoda cea mai simplă este de a îndepărta o oglindă (fig. 20) a cavităţii şi de a o aduce în poziţia corectă la momentul oportun. În acest scop, ea este rotită cu mare viteză de un motoraş (20 000—24 000 ture/minut).

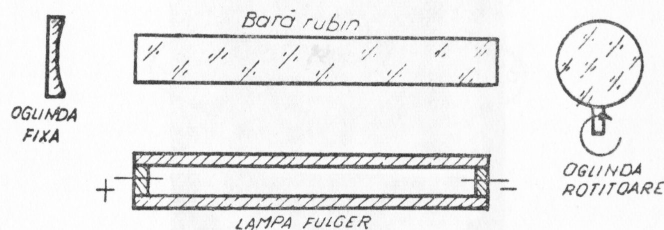


Fig. 20. Laser declanşat cu oglindă rotitoare.

O altă metodă este de a introduce în cavitate o substanţă absorbantă, care, la un anumit nivel de energie absorbită, devine transparentă. O astfel de substanţă este criptocianina.

Se obţin astfel pulsuri de numai cîteva nanosecunde (1 nanosecundă = 1 ns = 1/1 000 000 000 dintr-o secundă). Laserii cu corp solid sînt remarcabili deci prin puterile foarte mari pe care le emit şi prin durata extrem de redusă a pulsurilor, direcţionalitatea şi coerenţa lor fiind însă relativ scăzute faţă de ceilalţi laseri.

3.2. Laseri cu mediu activ semiconductor

Diferenţa esenţială dintre laserii cu mediu activ semiconductor şi toate celelalte tipuri de laseri constă în eficienţa mecanismului de pompaj. Pentru a obţine lumină laser se consumă, de regulă, energie electrică. În laserii pompaţi optic, energia electrică se consumă în descărcarea lămpii fulger, lumina lămpii excită atomii mediului activ şi aceştia emit lumină laser. Aceste transformări şi transferuri de energie se fac cu pierderi, randamentul final al laserilor cu mediu activ solid fiind mult sub 1% şi ajungînd la 1 — 2% pentru laserul cu neodim înglobat în YAG. În laserii cu mediu activ lichid sau gazos au loc de asemenea procese complicate prin care energia electrică este transformată în energie luminoasă coerentă.

În materiale semiconductoare există posibilitatea de a converti în mod direct energia electrică în lumină coerentă. Într-un semiconductor există două tipuri de purtători de sarcină electrică, capabili să se deplaseze pentru a da naştere unui cîmp electric: electronii liberi, ale căror energii se situează în banda de conducţie şi „găurile" a căror energie se situează în banda de valenţă. Teoria semiconductorilor arată că benzile de energie — de conducţie şi de valenţă, sînt constituite dintr-o mulţime de nivele discrete foarte apropiate unele de altele. Aceste stări nu pot fi ocupate decît de cel mult doi electroni. Ansamblul electronilor unui semiconductor trebuie să se repartizeze între aceste stări şi se arată

că ele se vor ocupa cu electroni pînă la un nivel energetic limită numit nivel Fermi. Frontiera dintre stările ocupate și cele goale nu e bine delimitată decît la temperatura de zero grade K (zero absolut). La alte temperaturi agitația termică face ca o parte din electroni să treacă pe nivele mai înalte și deci un număr egal de „găuri" să apară pe nivelele inferioare. În medie se menține un echilibru și nu poate să apară o inversie de populație. Dacă semiconductorul este dopat cu atomi care posedă un electron de valență în plus sau în minus față de materialul semiconductor gazdă, excesul sau lipsa de electroni se traduce prin deplasarea nivelului Fermi. Într-un semiconductor cu exces de electroni (de tipul n) toată banda de valență și chiar o parte din cea de conducție sînt ocupate, iar la semiconductorul de tip p, deci cu deficit de electroni, partea de sus a benzii de valență și toată banda de conducție sînt goale.

Puși în contact doi astfel de semiconductori dopați, se obține o joncțiune echilibrată, în sensul că nivelul Fermi este același pentru cele două materiale (fig. 21).

Dacă se impune trecerea unui curent prin joncțiune, echilibrul se strică. Nivelele de energie ale celor două materiale apar decalate cu energia $\Delta E = eV$ unde V este diferența de potențial aplicată, iar e sarcina electronului. Se constată (fig. 22) că în vecinătatea joncțiunii electronii din banda de conducție a unui semiconductor se dispun în dreptul locului gol din banda de valență a celuilalt. Apare astfel, local, o inversie de populație. Electronii din semiconductorul n tind să cadă în p, provocînd dispariția corespunzătoare a găurilor. Fiecare tranziție de acest fel provoacă emisia unui foton (electroluminescență). Astfel,

$$1 \text{ electron} + 1 \text{ gaură} \Rightarrow 1 \text{ foton}$$

și deci trecerea de la energia electrică la cea luminoasă se face direct obținîndu-se ușor randamente de 10%.

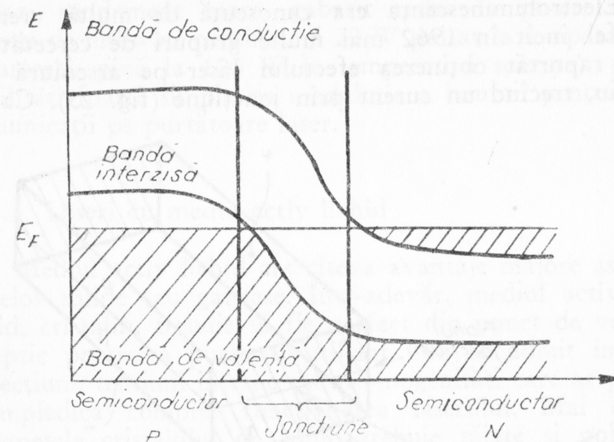


Fig. 21. Benzi de conducție și de valență într-o joncțiune; E_F = nivel Fermi.

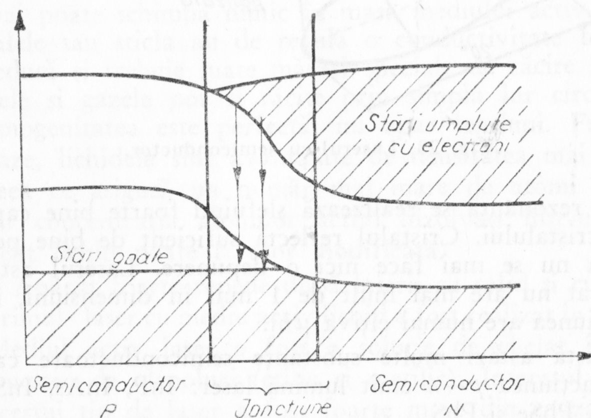


Fig. 22. Apariția inversiei de populație la trecerea unui curent electric prin joncțiune.

Electroluminescenţa era cunoscută de multă vreme, astfel încît în 1962 mai multe grupuri de cercetători au raportat obţinerea efectului laser pe arseniură de galiu, trecînd un curent prin joncţiune (fig. 23). Cavi-

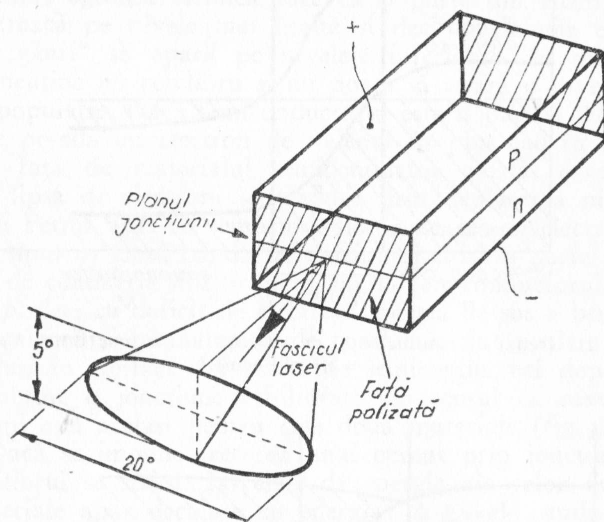


Fig. 23. Laserul cu semiconductor.

tatea rezonantă se realizează şlefuind foarte bine capetele cristalului. Cristalul reflectă suficient de bine pentru a nu se mai face nici o depunere. Laserul astfel realizat nu are mai mult de 1 mm în dimensiuni, iar joncţiunea are numai cîţiva μm.

Există astăzi multe substanţe semiconductoare care în joncţiunea *p—n* emit lumină laser: InP, InAs, InSb, PbTe, PbSe şi PbS.

Divergenţa acestor laseri este foarte mare, iar coerenţa lor redusă. Avantajele majore ale acestui tip de laseri

sînt: randament mare, gabarit redus la puteri mari (zeci de miliwaţi continuu şi 20 W pulsat la temperatura camerei, pînă la 100 W la temperaturi scăzute), posibilităţi foarte simple de modulaţie a luminii pentru comunicaţii pe purtătoare laser.

3.3. Laseri cu mediu activ lichid

Mediul activ lichid are cîteva avantaje majore asupra celor solide sau gazoase. Într-adevăr, mediul activ solid, cristalin, trebuie să fie perfect din punct de vedere optic pentru a putea fi utilizat. Nu se admit imperfecţiuni, tensiuni interne sau neomogenităţi care ar putea împiedica complet funcţionarea laserului. Mai mult, capetele cristalului de rubin trebuie tăiate şi polizate cu mare precizie şi după anumite direcţii. Astfel, prepararea unui mediu activ solid laser este o problemă dificilă, de durată şi costisitoare. Odată realizat nu se mai poate schimba nimic în masa mediului activ. Cristalele sau sticla au de regulă o conductivitate termică redusă şi trebuie luate măsuri speciale de răcire. Lichidele şi gazele pot fi răcite prin simpla lor circulaţie, omogenitatea este perfectă, nu apar tensiuni. Faţă de gaze, lichidele sînt avantajate de densitatea mai mare, ceea ce asigură un număr mai mare de atomi activi, iar concentraţia atomilor activi dizolvaţi într-un solvent lichid poate fi uşor modificată.

Apărut foarte repede după laserii cu solid şi cu gaze, primul laser cu mediu activ lichid a fost realizat în 1963. Mediul activ laser a fost o soluţie de chelat într-un amestec de alcooluri (etilic şi metilic). Interesul arătat acestui tip de laser a fost foarte mare din cauza posibilităţii de a circula lichidul şi deci de a păstra un bun regim termic, ceea ce permite utilizarea lui intensă.

Chelaţii sînt constituiţi dintr-un ion metalic situat în centrul unui edificiu molecular foarte complex.

Dacă ionul aparţine categoriei de elemente numită „pămînturi rare", se constată că lumina emisă spontan

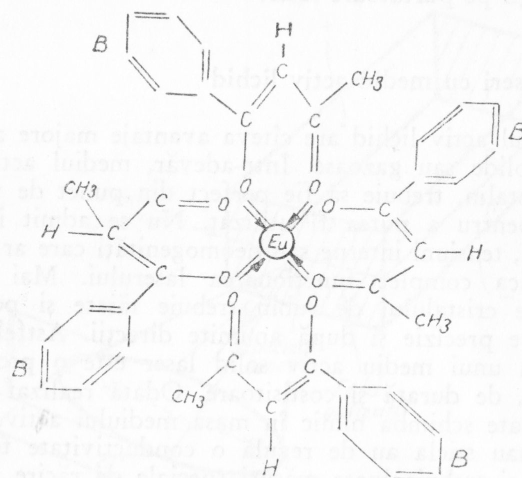


Fig. 24. Reprezentarea plană a unei molecule de chelat.

de ionul încorporat de chelat nu este influenţată de restul moleculei şi deci nivelele enegetice implicate în procesul de emisie sînt înguste ca şi cum ar aparţine ionului liber. Pe de altă parte, chelaţii posedă capacitatea de a absorbi multă lumină în domeniul ultraviolet, absorbţie proprie întregii molecule. Energia luminoasă captată de întreaga moleculă poate fi transferată ionului şi astfel avem un mecanism de pompaj comod. Chelaţii sînt astfel un mediu laser ideal: au o bandă de absorbţie foarte largă şi deci pot fi uşor pompaţi optic, iar lumina emisă are o bandă îngustă, nivelele energetice implicate fiind ionice şi nu moleculare.

Laserii cu mediu activ lichid cei mai cunoscuţi astăzi sînt laserii cu coloranţi organici dizolvaţi într-un solvent oarecare. Astfel coloranţii tipici sînt rodamina dizolvată în alcool şi fluoresceina dizolvată în apă. Aceste substanţe absorb puternic lumina vizibilă. Excitarea lor se face, din acest motiv, prin pompaj optic fie cu un alt laser, fie cu o lampă fulger. Laserii cu coloranţi emit pulsuri scurte de lumină cu o lărgime de bandă mare. Distribuţia spectrală a semnalului laser emis depinde de solventul utilizat, de concentraţia de colorant şi de alţi parametri. Din cauza acestei dependenţe laserii cu coloranţi pot acoperi o mare parte a spectrului vizibil. Astfel laserul „acordabil" cu rodamină poate emite între 5000 şi 6000 Å. Cum există un număr mare de coloranţi capabili de efect laser, se poate obţine lumină coerentă de orice lungime de undă între 3 300 şi 11 760 Å. Aceste calităţi recomandă laserii cu coloranţi ca sursă de lumină acordabilă în fotobiologie, fotochimie şi spectroscopie.

Randamentul laserilor cu colorant este foarte mare putînd atinge 25%. Astfel, un laser cu colorant pompat fotonic de un laser cu rubin de 25 MW a emis un semnal de 6 MW.

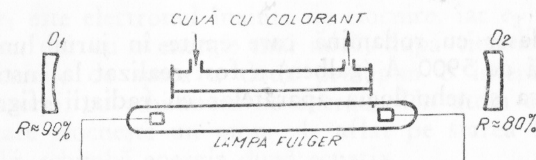


Fig. 25. Elementele unui laser cu colorant.

Un laser cu colorant (fig. 25) cuprinde o celulă de sticlă sau cuarţ cu ferestre din acelaşi material prelucrate optic. Celula cu colorant este cuplată la un mic

rezervor cu colorant și o pompă care circulă permanent colorantul. Cuva este așezată între oglinzile cavității rezonante și paralelă cu lampa fulger.

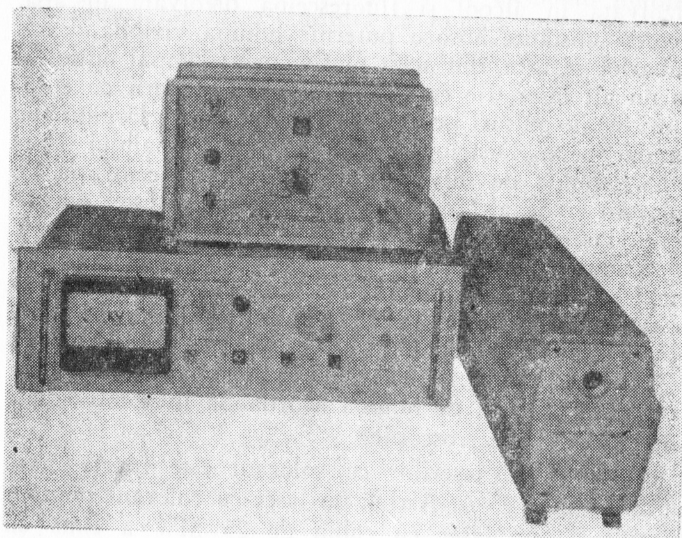


Fig. 26. Laser cu colorant realizat în Institutul de fizica și tehnologia aparatelor cu radiații.

Un laser cu rodamină care emite în jurul lungimii de undă de 5900 Å (galben) a fost realizat la Institutul de fizica și tehnologia aparatelor cu radiații (fig. 26).

3.4. Laseri cu mediu activ gazos

Există foarte multe tipuri de laseri care au ca mediu activ gaze sau amestecuri de gaze. Aceste gaze pot fi atomice (heliu, neon, argon, kripton etc.) sau moleculare (bioxid de carbon).

Nivelele de energie între care au loc tranzițiile radiative stimulate pot fi nivele ale atomilor, ale atomilor ionizați (ioni) sau nivele moleculare. Ajungem astfel să clasificăm laserii cu gaz în trei mari clase, după natura nivelelor de energie care participă la obținerea luminii coerente:

a) laseri care folosesc tranziții între nivele atomice de energie cum sînt laserul cu heliu și neon, sau laserul cu heliu și vapori de cadmiu;

b) laseri care folosesc tranzițiile dintre nivelele energetice ale ionilor unor atomi, cum sînt laserii cu argon sau kripton;

c) laserii moleculari, în care caz au loc tranziții între nivelele energetice de vibrație-rotație ale moleculelor, ca la laserul cu bioxid de carbon (CO_2).

Procesul de pompaj este ceva mai complicat în cazul gazelor. Excitarea atomilor unui gaz se face, de regulă, prin ciocniri de speța întîi sau a doua.

În ciocnirile de speța întîia un electron interacționează cu un atom cedîndu-i energia. Astfel, atomul A, aflat în starea energetică fundamentală (starea de energie minimă), trece în starea de energie superioară A^* după ecuația

$$A+e_1=A^*+e_2,$$

unde e_1 este electronul înainte de ciocnire, iar e_2 același electron, dar cu o energie mai mică, după ciocnire.

Ciocnirile de speța a doua presupun o interacțiune între atomi, cu schimbare de energie. Un atom excitat, A_2^*, care ciocnește un atom A_1 aflat pe starea fundamentală, schimbă energia după ecuația

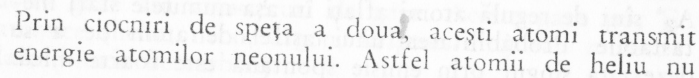
$$A_1+A_2^*=A_1^*+A_2,$$

unde semnul * indică un atom excitat. Atomii de tipul A_2^* sînt de regulă atomi aflați în așa-numitele stări metastabile. Probabilitatea unui astfel de atom de a se dezexcita singur prin emisie spontană este foarte mică.

Laseri atomici. Exemplul tipic de laser atomic este laserul cu heliu şi neon. Ambele tipuri de ciocniri sînt implicate în procesul de emitere a luminii coerente. O diagramă a nivelelor de energie ale heliului şi neonului este dată în figura 27. În cazul neonului am reprezentat prin dreptunghiuri un număr mare de nivele energetice foarte apropiate. Prin ciocniri de speţa întîi, datorate descărcării electrice prin amestecul cu heliu şi neon, atomii de heliu trec de pe nivelul fundamental pe nivelele metastabile notate cu *M*. Ecuaţia procesului este deci

Fig. 27. Diagrama nivelelor laserului cu He-Ne (nivelele sînt notate cu litere şi cifre care indică energia şi locul nivelului în structura energetică a atomului).

$$\mathrm{He}+e_1=\mathrm{He}^*+e_2.$$



Prin ciocniri de speţa a doua, aceşti atomi transmit energie atomilor neonului. Astfel atomii de heliu nu joacă alt rol în laserul cu heliu şi neon decît acela de a „pompa“ atomii cu neon.

Efectul laser se obţine numai prin tranziţii între nivele ale neonului. Laserul cu heliu şi neon poate emite mai multe lungimi de undă, dar cea mai cunoscută şi mai des utilizată este lumina roşie de lungime de undă $\lambda=6328$ Å.

Fig. 28. Laser cu Heliu-Neon realizat de I.F.T.A.R.

Un laser cu heliu şi neon (fig. 28) este format dintr-un tub de sticlă umplut cu heliu la presiunea de 2 mm coloană de mercur şi neon la presiunea de 0,1 mm coloană de mercur. Tubul este închis cu două ferestre de calitate optică foarte bună din sticlă sau cuarţ optic. Ele fac un unghi θ_B numit unghiul Brewster, cu axa tubului (fig. 29), astfel încît

$$\operatorname{tg}\theta_B=n,$$

Fig. 29. Elemente constructive ale laserului cu He-Ne.

unde n este indicele de refracţie al ferestrei. Aşezarea ferestrelor sub acest unghi reduce la minimum pierderile prin reflexie pe ferestre şi determină polarizarea liniară a fasciculului laser emergent.

Tubul laser este prevăzut cu doi electrozi între care se aplică o tensiune electrică de 2000—4000 V, determinînd astfel apariţia unui curent electric de 6 — 12 mA. Tensiunea este furnizată de o sursă electrică de alimentare.

Oglinzile cavităţii rezonante sînt formate dintr-un suport de sticlă sau cuarţ optic, pe care sînt depuse straturi reflectante. Tehnica depunerilor straturilor reflectante multiple este singura capabilă să producă reflexii foarte mari, de ordinul 99,9%. Una dintre oglinzi are o reflexie cît mai mare cu putinţă (către 100%) iar cealaltă o reflexie de numai 97 — 98%. Această oglindă se numeşte oglindă de ieşire pentru că asigură ieşirea luminii laser din cavitatea rezonantă.

Puterea laserului cu He-Ne, laser care emite continuu, este cuprinsă între 1 şi 100 mW; este deci un laser de putere mică. Densitatea scăzută a amestecului de gaze nu poate asigura o amplificare mare. Aceasta atrage după sine folosirea unor coeficienţi de reflexie foarte mari la oglinzile cavităţii rezonante, mărindu-se astfel numărul de parcursuri ale fotonilor prin mediul amplificator. În mod logic rezultă o mare selectivitate în direcţionalitate şi în lărgimea de bandă a acestor laseri.

Într-adevăr, laserul cu heliu şi neon produce lumina coerentă cu cele mai înalte calităţi şi monocromaticitate, direcţionalitate şi coerenţă.

Laserii ionici. Vom analiza un singur model tipic, laserul cu argon ionizat. Un atom o dată ionizat este un atom care şi-a pierdut un electron, un atom dublu ionizat a pierdut doi electroni şi aşa mai departe. Prin pierderea

unui electron, atomul neutru se încarcă electric pozitiv. Un atom odată ionizat se notează A^+, de două ori ionizat A^{++} etc. Pentru a strica edificiul atomic al unui atom este nevoie de mult mai multă energie decît pentru a-l excita. Într-adevăr, laserul cu argon ionizat consumă mult mai multă energie decît laserul cu heliu şi neon.

Această energie este consumată odată pentru ionizarea atomului de argon şi apoi pentru excitarea ionului Ar^+.

Ambele procese se fac prin ciocniri de speţa întîi după relaţia

$$e_1 + Ar = (Ar^+)^* + e_2 + e_3,$$

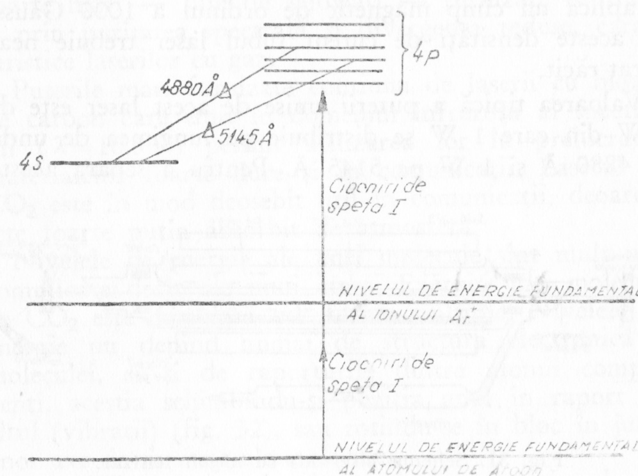


Fig. 30. Nivelele energetice ale argonului ionizat.

unde e_1 este electronul care ciocneşte atomul de Ar, îi cedează o parte din energie şi rămîne e_2, iar e_3 este electronul smuls atomului de Ar în urma impactului.

Schema nivelelor energetice ale ionului de argon este reprezentată în figura 30. Laserul cu argon emite un mare număr de linii laser dintre care liniile 4880 Å și 5145 Å sînt cele mai intense.

Construcția unui laser cu argon ridică probleme deosebit de grele. Energia electrică foarte mare necesară ionizării argonului implică utilizarea unor curenți electrici mari (40—50 A) pentru tuburi din cuarț sau oxid de beriliu capabile să reziste la temperaturi mari. Presiunea gazului din aceste tuburi este de 0,7 mm coloană de mercur. Pentru a mări densitatea în electroni a descărcării și a mări astfel posibilitatea de ciocnire a acestora cu atomii argonului, în jurul tubului laser se aplică un cîmp magnetic de ordinul a 1000 Gauss. La aceste densități de curent tubul laser trebuie neapărat răcit.

Valoarea tipică a puterii emise de acest laser este de 3 W din care 1 W se distribuie pe lungimea de undă de 4880 Å și 1 W pe 5145 Å. Pentru a separa aceste

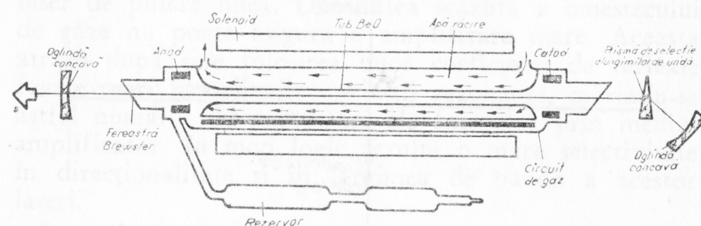


Fig. 31. Schema laserului cu argon ionizat.

linii laser se încorporează în cavitatea rezonantă și o mică prismă (figura 31).

Laserul cu argon ionizat, prin puterea relativ mare pe care o furnizează în mod continuu în domeniul vizibil al spectrului electromagnetic, se face util în spectroscopia Raman, în holografie și în interferometrie holografică.

Laseri moleculari. Multă vreme s-a considerat că laserii cu mediu activ solid sînt cei mai puternici. Argumentul principal a fost densitatea mare a atomilor activi într-un corp solid. Dezavantajele laserilor cu mediu activ solid le-am văzut: cost ridicat, emit pulsuri foarte scurte, randament foarte scăzut, lărgimea de bandă este mare, divergența de asemenea.

O nouă clasă de laseri, laserii moleculari și mai ales laserii cu bioxid de carbon s-au impus prin puterile foarte mari — sute de kilowați — furnizate continuu și prin puritatea spectrală și divergența reduse, caracteristice laserilor cu gaz.

Puterile mari furnizate continuu de laserii cu bioxid de carbon care emit în domeniul infraroșu al spectrului ($\lambda = 10{,}5\ \mu$) permit utilizarea lor în prelucrarea materialelor foarte dure și în comunicații. Laserul cu CO_2 este în mod deosebit util în comunicații, deoarece este foarte puțin absorbit de atmosferă.

Nivelele de energie ale unei molecule sînt mult mai complicate decît ale unui atom. Energia unei molecule de CO_2 este cumulată sub forme multiple. Nivelele de energie nu depind numai de structura electronică a moleculei, ci și de raporturile dintre atomii componenți, aceștia schimbîndu-și poziția unul în raport cu altul (vibrații) (fig. 32), sau rotindu-se în bloc în jurul unor axe de simetrie ale moleculei.

Tranzițiile laser au loc între nivele energetice de vibrație ale moleculei de CO_2 (fig. 33).

Bioxidul de carbon este amestecat cu azot și heliu. Azotul joacă în laserul cu CO_2 un rol similar cu He în laserul cu heliu neon. Prin ciocniri de speța întîia azotul este excitat pe un nivel energetic superior

(fig. 33). Printr-o ciocnire de speţa a doua atomul excitat de azot cedează energia proprie unei molecule de CO_2. Molecula de CO_2 rămîne excitată pe un nivel

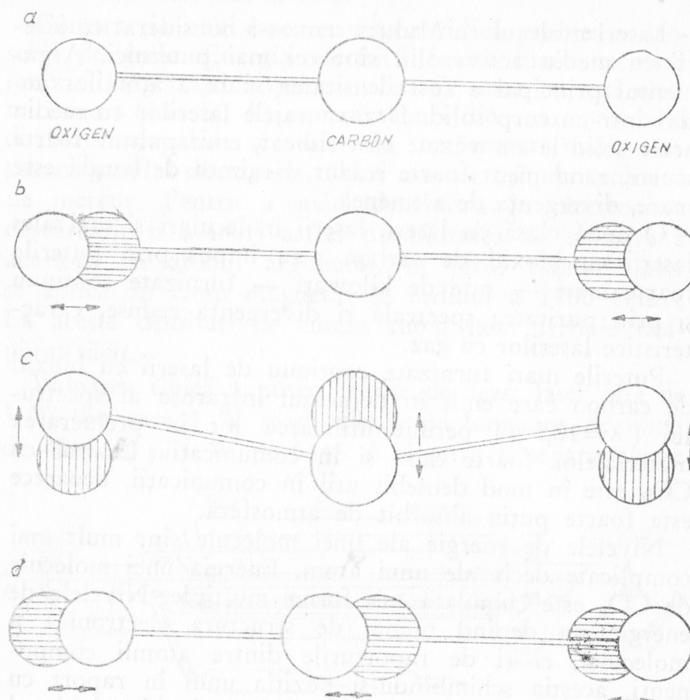
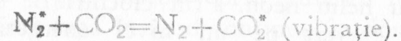


Fig. 32. Moduri de vibraţie ale moleculei de CO_2.

energetic de vibraţie, adică energia de vibraţie a moleculei este modificată prin această ciocnire. Ciocnirea de speţa a doua are deci o ecuaţie de genul următor



$$N_2^* + CO_2 = N_2 + CO_2^* \text{ (vibraţie).}$$

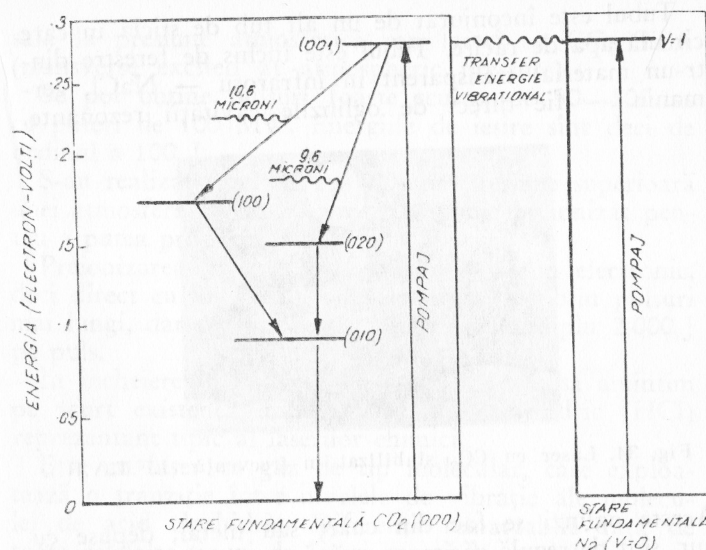


Fig. 33. Diagrama nivelelor de energie de vibraţie ale moleculei de CO_2.

Transferul de energie are loc din cauza apropierii nivelelor de energie ale azotului de nivele superioare de energie de vibraţie ale moleculei de CO_2 (fig. 33) Azotul joacă deci un rol în mecanismul de pompaj, iar heliul are şi el un rol auxiliar destul de important. El măreşte conductivitatea termică a amestecului gazos către pereţi, permiţînd deci o răcire mai eficientă şi în plus joacă un rol în mărirea inversiei de populaţie între nivelele laser, prin „golirea" nivelului laser inferior.

Linia laser principală se produce în infraroşu, la lungimea de undă de 10,6 μm. Amestecul gazos este introdus într-un tub de sticlă sau cuarţ, prevăzut cu electrozi între care se produce descărcarea electrică.

Tubul este înconjurat de un alt tub de sticlă în care circulă apa de răcire. Tubul este închis de ferestre din-tr-un material transparent în infraroşu — NaCl, germaniu — fie direct de oglinzile cavităţii rezonante.

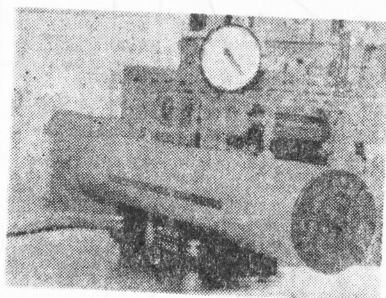


Fig. 34. Laser cu CO_2 stabilizat în frecvenţă (I.F.T.A.R.).

Aceste oglinzi se fac din cuarţ sau metal, depuse cu aur, sînt de regulă răcite cu apă, iar oglinda de extracţie are o mică gaură centrală din care iese fasciculul laser. Oglinzile pot fi realizate şi din germaniu transparent la 10,6 μm, pe care se depun straturi dielectrice multiple. În figura 34 este prezentat un laser cu CO_2.

Laserii cu CO_2 pot produce şi pulsuri scurte de mare putere fie prin pulsarea descărcării electrice, fie prin declanşarea laserului cu o oglindă rotitoare.

Puterea laserilor cu CO_2 în impulsuri poate fi mult crescută prin creşterea presiunii gazelor. Pentru laserii cu CO_2 în regim continuu, presiunea totală a amestecului de gaze este de 40—80 milimetri coloană de mercur, raportul presiunilor $CO_2 : N_2 : He$ fiind 1 : 1 : 6. Crescînd presiunea totală pînă la o atmosferă, descărcarea electrică nu se mai face în lungul tubului ci transversal pe electrozii de o formă specială. De aici numele acestor laseri: laseri cu descărcare electrică transver-

sală la presiune atmosferică sau laseri cu CO_2 TEA (transverse excited at atmospheric pressure).

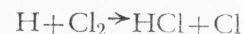
Se pot obţine pulsuri foarte scurte, de 50—100 ns cu puteri de 100 MW. Energiile de ieşire sînt deci de ordinul a 100 J.

S-au realizat şi laseri cu CO_2 de presiune superioară unei atmosfere în care caz gazul trebuie preionizat pentru a putea produce descărcarea electrică.

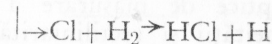
Preionizarea se face cu ajutorul unui tun electronic, deci direct cu un fascicul de electroni. Se obţin pulsuri mai lungi, dar de energii mai mari, de exemplu 2 000 J pe puls.

În încheierea capitolului de laseri cu gaz să amintim pe scurt existenţa laserului cu acid clorhidric (HCl) reprezentant tipic al laserilor chimici.

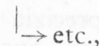
Este un laser cu gaz de tip molecular, care exploatează o tranziţie între nivelele de vibraţie ale moleculei de acid clorhidric. Diferenţa remarcabilă faţă de toate celelalte tipuri de laseri constă în modul de pompaj al laserului cu HCl. Încă din 1958 s-a observat că reacţia clorului molecular cu hidrogenul disociat în atomi, reacţie în urma căreia rezultă acidul clorhidric, este însoţită de emisia unei radiaţii electromagnetice. Radiaţia apare deoarece o parte din energia chimică a reacţiei în lanţ



$$H + Cl_2 \rightarrow HCl + Cl$$



$$\quad \vert\!\rightarrow Cl + H_2 \rightarrow HCl + H$$



$$\quad\quad \vert\!\rightarrow \text{etc.,}$$

iniţiată de atomii de hidrogen, era convertită în energie de vibraţie. Exploatînd această proprietate s-a realizat primul laser chimic capabil să emită la lungimea de undă de 37 730 Å.

Alte reacţii chimice au fost exploatate în acelaşi sens, obţinîndu-se o gamă destul de bogată de laseri chimici.

4. APLICAŢIILE LASERILOR ÎN ŞTIINŢĂ ŞI TEHNICĂ

Au trecut aproape două decenii de la prima licărire de lumină coerentă şi interesul cercetătorilor faţă de laseri este neschimbat. Explicaţia acestui interes major constă în multitudinea de aplicaţii ale luminii laser în cele mai diverse şi mai de nebănuit domenii ale activităţii umane: ştiinţă, tehnică, medicină, viaţă socială. Vom trece în revistă foarte pe scurt cîteva dintre aplicaţiile cele mai cunoscute şi mai bine puse la punct, aplicaţii care au depăşit stadiul de experienţe de laborator. Laserul se dovedeşte astfel un instrument minunat în lupta omului pentru progres.

4.1. Aplicaţii în metrologie

Metodele optice de măsurare a dimensiunilor, unghiurilor, planeităţii şi rectiliniarităţii sînt recunoscute pentru precizia lor deosebită. Rareori însă au părăsit laboratorul. Sursele de lumină convenţionale erau cele care limitau extinderea acestor metode în condiţiile de lucru industriale.

Laserul cu heliu şi neon este cel mai mult utilizat în metrologie pentru coerenţa sa foarte mare, pentru intensitatea şi preţul de cost scăzut, robusteţea şi simplitatea sa.

Măsurători de lungimi. Pentru măsurarea lungimilor se foloseşte fenomenul de interferenţă (vezi secţiunea 2.3). Referindu-ne la figura 12, remarcăm că la deplasarea uneia dintre oglinzile interferometrului în lungul axei sale optice se deplasează şi franjele de interferenţă în planul de observaţie.

Trecerea de la un minim luminos la un alt minim luminos succesiv în planul franjelor înseamnă că oglinda s-a deplasat cu o jumătate de lungime de undă ($\lambda = 0{,}6\,328$ μm). Astfel se pot pune în evidenţă şi măsura deplasări cu precizia de 0,3 μm. Această precizie poate fi coborîtă chiar pînă la 0,01 μm. În practică oglinzile sînt înlocuite (fig. 35) cu prisme colţ de cub, care sînt mult mai puţin sensibile la vibraţii. Semnalul de ieşire cade pe un fotodetector care sesizează minimele şi maximele luminoase. Ele sînt numărate de un contor, convertite în unităţi de lungime şi afişate.

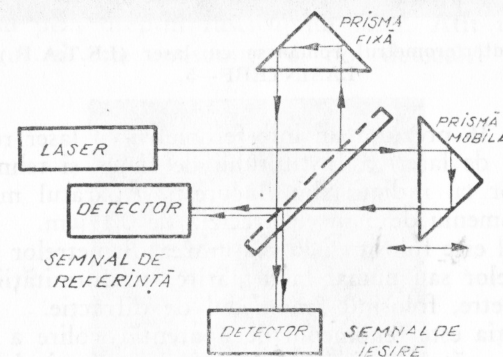


Fig. 35. Interferometru Michelson pentru măsurarea lungimilor (schemă).

Pentru a măsura o dimensiune cu acest aparat, oglinda mobilă este deplasată corespunzător în lungul

direcţiei dorite. Lungimea mare de coerenţă a laserului cu heliu şi neon permite măsurarea în mod continuu de la 0 la 10 m şi, cu precizie mai mică, pînă la 100 m.

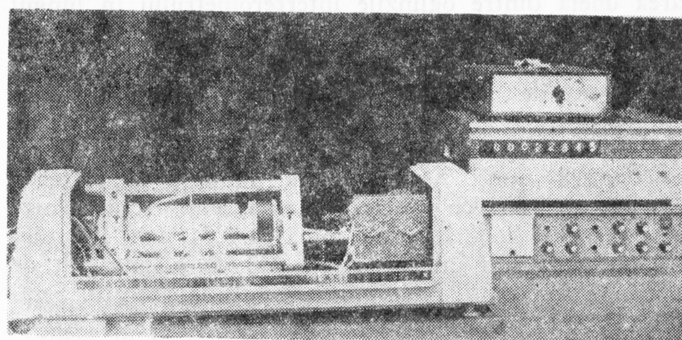


Fig. 36. Interferometrul românesc cu laser (I.F.T.A.R.) model LASINTERF–5.

Figura 36 prezintă un interferometru cu laser realizat în Secţia de laseri a Institutului de fizica şi tehnologia aparatelor cu radiaţii din Bucureşti. Aparatul măsoară pe un domeniu de 5 m cu precizia de 0,1 μm.

Laserul este folosit şi la măsurarea diametrelor firelor sau sîrmelor sau numai la urmărirea uniformităţii acestor diametre, folosind fenomenul de difracţie.

Difracţia este fenomenul de aparentă ocolire a obstacolelor de către lumină. Astfel, cînd un fascicul de lumină colimat cade pe o sîrmă (fig. 37), pe un paravan aflat la o distanţă oarecare nu se obţine pur şi simplu umbra sîrmei, ci o serie de maxime şi minime luminoase, numite franje de difracţie (fig. 38). Distanţa D între primele minime luminoase din vecinătatea centrului figurii este legată de diametrul sîrmei d prin relaţia

$$D=\frac{\lambda F}{d}$$

unde λ este lungimea de undă a luminii laser, iar F este distanţa focală a lentilei L, care proiectează figura de difracţie pe doi detectori. Detectorii sînt astfel aşe-

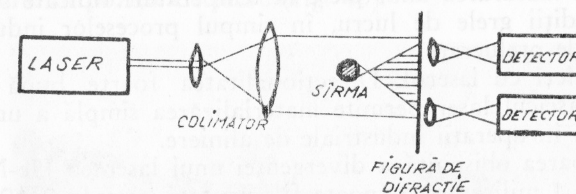


Fig. 37. Schema de principiu a unui aparat cu laser pentru supravegherea uniformităţii diametrelor.

zaţi ca pe ei să cadă un minim. Sîrma trece în mod continuu prin dreptul fasciculului laser. Atît timp cît diametrul ei este constant, cei doi detectori nu pri-

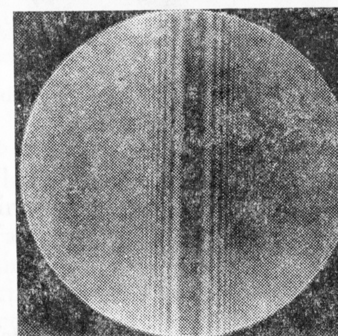


Fig. 38. Figura de difracţie a unei sîrme.

mesc lumină. Cînd diametrul sîrmei se schimbă, detectorii nu se mai află în dreptul minimelor luminoase, primesc lumină şi semnalizează eroarea. În acest fel,

se pot determina cu mare precizie diametre foarte mici în domeniul 1—100 μm.

Deoarece metoda este fără contact, ea poate fi utilizată la măsurarea unor piese la temperaturi ridicate sau în condiţii grele de lucru, în timpul proceselor industriale de prelucrare.

Alinieri cu laserul. Direcţionalitatea foarte bună a unui fascicul laser permite materializarea simplă a unei direcţii în operaţii industriale de aliniere.

Valoarea obişnuită a divergenţei unui laser cu He-Ne este de 1 miliradian şi poate fi corectată pînă la $2 \cdot 10^{-5}$ radiani cu ajutorul unui colimator.

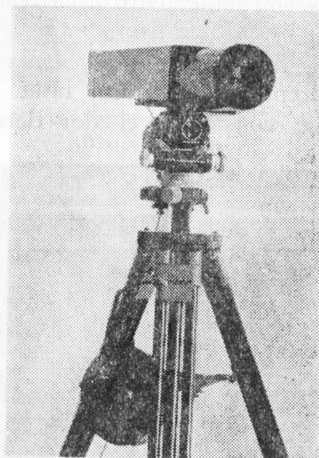


Fig. 39. Laser de aliniere pentru poduri, drumuri, căi ferate (I.F.T.A.R.).

Un laser de 1—2 mW este suficient pentru astfel de aplicaţii. El se aşază pe un trepied în cazul alinierilor de drumuri, poduri, căi ferate (fig. 39) sau pe tavanul galeriilor de aducţiune ale hidrocentralelor, în mine,

metrouri etc. Folosit la alinierea turnurilor şi clădirilor înalte, se aşază vertical. În paralel cu axa laserului se montează o lunetă de vizare care permite punerea aparatului în poziţie de lucru (fig. 40).

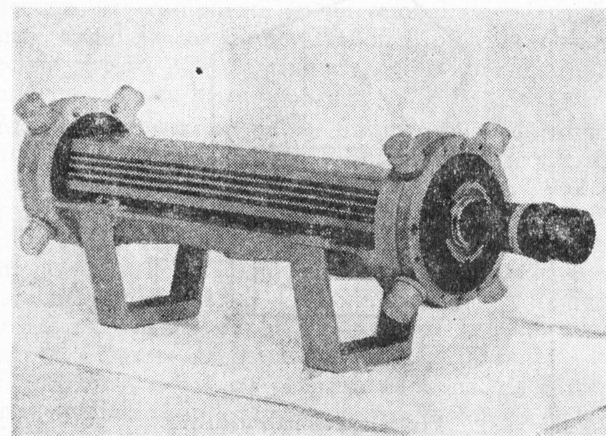


Fig. 40. Laser de aliniere pentru tuneluri de aducţiune, mine, metrouri (I.F.T.A.R.).

Fasciculul laser, vizibil prin aer, serveşte astfel ca linie de referinţă faţă de care se aliniază elementele de construcţie. Fasciculul este vizibil pînă la 1 km, precizia de aliniere fiind de cîţiva milimetri la această distanţă. Precizia poate fi mărită dacă se folosesc sisteme de detecţie a centrului fasciculului laser.

În unele aplicaţii, cum ar fi montarea stîlpilor de susţinere a podurilor rulante, este necesară materializarea unui plan. Pentru a materializa un plan, fasciculul laser este trimis printr-o prismă rotitoare (fig. 41).

Radarul optic. Aparatul permite localizarea cu mare precizie a unui obiect aflat în jurul aparatului pînă la

8—10 km. Precizia obişnuită a aparatului, atunci cînd se foloseşte un laser pulsat, este de ±5 m. Radarul cu laser — numit şi LIDAR — determină intervalul de

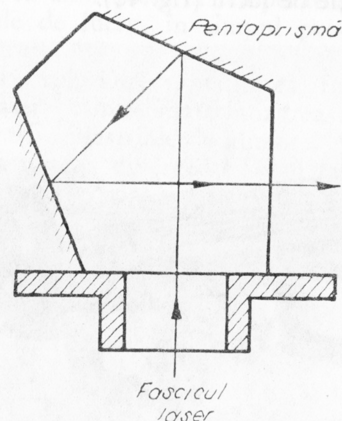


Fig. 41. Prismă rotitoare.

timp dintre momentul plecării unui impuls laser şi momentul întoarcerii. Schema de lucru este dată în figura 42.

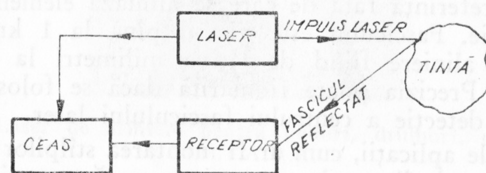


Fig. 42. Schema de principiu a radarului cu laser.

Pentru laserii care lucrează în regim de impulsuri, trebuie avut în vedere ca durata pulsului să fie mult mai

mică decît timpul necesar luminii să se întoarcă de la obiect.

Precizia şi bătaia aparatului pot fi mult mărite dacă se foloseşte o prismă retroreflectoare şi un laser continuu, modulat în intensitate. În acest caz, faza undei reflectate este comparată cu un semnal de referinţă. Se ajunge astfel la măsurarea distanţei pînă la obiect cu precizia ±5 m pînă la cîteva zeci de km distanţă, folosind un laser cu heliu-neon.

Măsurarea intervalului de timp între momentul declanşării impulsului laser şi momentul recepţionării fasciculului reflectat a fost utilizată încă din 1962 pentru măsurarea distanţei de la Pămînt la Luna. Primele rezultate nu au fost concludente din cauza lungimii mari a pulsurilor laserului cu rubin. Încercările ulterioare, făcute în 1965 în U.R.S.S. cu laseri în regim declanşat, cu pulsuri de 50 ns, au dus la determinarea distanţei Pămînt—Lună cu o eroare de 200 m.

După 1969, odată cu plasarea pe Lună, de către misiunea spaţială Apollo 11, a unui reflector special, precizia atinsă a fost de ±15 cm faţă de ±3 km, eroarea calculului astronomic convenţional.

Măsurători de viteze. O primă posibilitate de a măsura viteze de deplasare ar fi utilizarea interferometrului Michelson cu laser. În acest caz, se determină numărul de franje care trec prin faţa detectorului în unitatea de timp. Metoda este aplicabilă la viteze mici, de ordinul 0,1 m/s.

O metodă specifică măsurătorilor de viteze este metoda care utilizează efectul Doppler. Efectul Doppler apare ca urmare a schimbării poziţiei relative a sursei de lumină faţă de observator şi se manifestă prin schimbarea frecvenţei luminii recepţionate. Cînd detectorul şi sursa sînt fixe (figura 43), iar ţinta se află în mişcare

cu viteza μ, frecvenţa luminii laser, difuzată de obiect către detector, se modifică cu valoarea

$$\Delta f = \frac{2\mu}{\lambda} \cos \theta,$$

unde λ este lungimea de undă a laserului, iar θ unghiul dintre direcţia de mişcare a ţintei şi direcţia de observare.

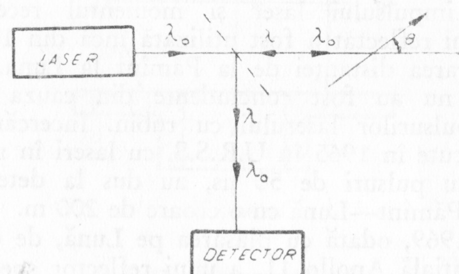


Fig. 43. Schema vitezometrului cu laser.

Aparatul poate fi folosit pentru măsurarea vitezei fluidelor transparente. În timpul curgerii, fluctuaţiile locale de presiune din fluid produc împrăştierea luminii laser. Astfel, o parte din lumină este reflectată înapoi şi cum fluctuaţiile de presiune se propagă cu viteza fluidului, lumina difuzată suferă efectul Doppler. Aparatul poate lucra şi la viteze mici şi la viteze mari şi este util prin faptul că nu presupune contactul cu obiectul în mişcare. El poate fi folosit în condiţii foarte grele de lucru, la măsurarea vitezei tablei în laminoare, a firelor sintetice, a vitezei fluidelor — lichide şi gazoase — în conducte sau tuneluri aerodinamice etc.

4.2. Aplicaţiile laserilor în comunicaţii

Ideea de a folosi lumina ca purtătoare de informaţii nu e nouă şi nu a apărut odată cu laserii. Invenţia laserului nu a făcut decît să furnizeze sursa de lumină ideală pentru un sistem optic de comunicaţii.

Cele mai multe sisteme de comunicaţii — radio, televiziune — au ca principiu modularea cu semnalul util a unei unde purtătoare, de frecvenţă mare. În acest fel, aceeaşi undă purtătoare poate transporta mai multe semnale independente sau, cum se mai spune, informaţia se transmite pe mai multe canale. Numărul de canale este limitat de frecvenţa purtătoarei. Astfel, pentru banda de unde radio lungi (30 kHz—300 kHz), folosită ca purtătoare, se pot transmite maximum nouă convorbiri telefonice, pentru unde ultrascurte (300 MHz 3 000 MHz) capacitatea de transmitere a informaţiei creşte la 100 000 de canale telefonice şi 100 canale de televiziune. Pentru frecvenţa de oscilaţie a luminii, de ordinul a 10^{13}—10^{15} Hz, numărul de canale telefonice devine de ordinul milioanelor, iar numărul de canale de televiziune ajunge la ordinul sutelor de mii. Teoretic vorbind, un fascicul laser ar asigura toate necesităţile de comunicaţii ale omenirii.



Fig. 44. Elementele unui sistem de comunicaţii cu laser.

Un sistem de comunicaţii pe purtătoare laser cuprinde de regulă elementele indicate în figura 44.

Tipul de laser diferă de la un sistem la altul. Laserul cu semiconductor are avantajul modulării foarte uşoare

şi al gabaritului redus. Prin simpla modulare a curentului de alimentare al joncţiunii se pot obţine frecvenţe de ordinul 10^{10} Hz. Laserul cu semiconductor are în schimb divergenţă foarte mare (15°) şi coerenţă foarte redusă.

Laserii cu gaz au avantajul unei direcţionalităţi foarte bune şi o stabilitate în frecvenţă remarcabilă, au însă dezavantajul gabaritului relativ mare şi un timp de funcţionare limitat (~10 000 ore pentru laserul cu He-Ne şi mai puţin pentru toate celelalte tipuri de laseri cu gaz).

Modularea luminii laser se face prin metode diverse. Modularea în amplitudine se poate face pur şi simplu mecanic, cu un obturator, prin modularea tensiunii de alimentare, sau cu metode mai rafinate, folosind cristale electrooptice (efect Pockels). Se ajunge astfel la frecvenţe de modulaţie de 10—100 MHz.

Pentru modularea în frecvenţă se utilizează efectul Doppler sau modulatori acusto-optici.

Sistemul cel mai promiţător de modulaţie utilizabil în comunicaţiile cu laser pare a fi sistemul de codificare a impulsurilor laser. Metoda constă în modificarea unei succesiuni de impulsuri laser echidistante şi rapide în timp prin simpla suprimare a pulsurilor în codul folosit. Astfel, un detector nu trebuie să stabilească decît prezenţa sau absenţa unui impuls laser, indiferent de amplitudinea lui. Acesta este marele avantaj al metodei, în condiţii de propagare prin atmosferă.

Propagarea în atmosfera turbulentă este dificultatea cea mai mare în dezvoltarea comunicaţiilor cu laser. Ele devin impracticabile pe ploaie, ceaţă, fum, iar neomogenităţile şi gradienţii termici produc distorsionarea transmisiei. Mai mult, prezenţa vaporilor de apă şi a bioxidului de carbon în atmosferă duce la absorbţia radiaţiei. Atmosfera este complet transparentă numai pentru anumite lungimi de undă, altele fiind complet absorbite. Zonele de transparenţă, numite şi „ferestre", sînt indicate în figura 45.

Din figură se vede că lumina laserului cu CO_2 ($\lambda = 10,6$ μm) se propagă foarte bine în atmosferă.

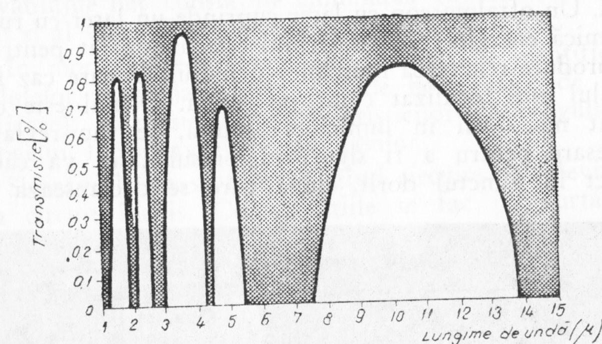


Fig. 45. Ferestrele de transmisie atmosferică.

În spaţiul extraterestru comunicaţiile laser sînt nelimitate. Pe pămînt soluţia preconizată este utilizarea cablurilor de lumină — fibrele optice — capabile să transmită lumina pe zeci de kilometri cu pierderi minime.

4.3. Aplicaţiile laserilor în medicină şi biologie

Pentru a folosi laserul în medicină, prima problemă care se ridică este controlul în condiţii foarte bune al parametrilor laserului, în primul rînd energia sa, pentru a avea posibilitatea să se concentreze această energie exact în zona dorită.

Primul şi cel mai important grup de aplicaţii se referă la folosirea energiei laserului, a intensităţii sale remar-

cabile. Al doilea grup de aplicaţii în medicină cuprinde aplicaţii indirecte privind observarea şi prelucrarea datelor sau a probelor biologice.

Una dintre cele mai cunoscute aplicaţii ale laserului în medicină este realizarea operaţiilor de lipire de retină. Un oftalmoscop cu laser cuprinde un laser cu rubin de mică energie (~ 1 J). Ochiul este anesteziat pentru a se produce relaxarea muşchilor ochiului, în care caz fasciculul este focalizat chiar pe retină. Ochiul este cercetat mai întîi în lumină obişnuită, se fac reglajele necesare pentru a fi siguri că pulsul laser va cădea exact în punctul dorit, după care se declanşează la-

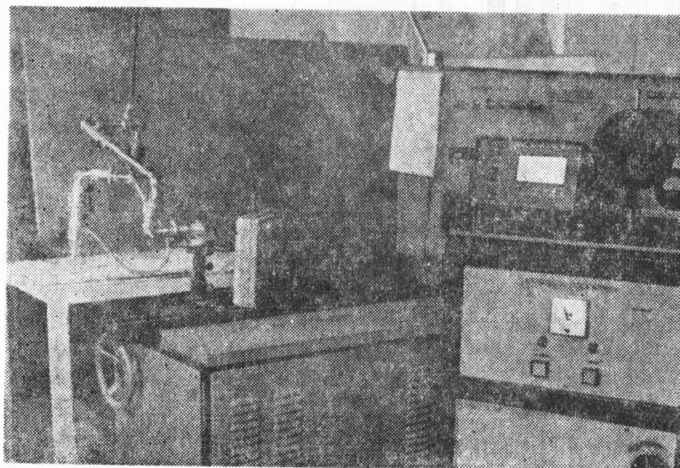


Fig. 46. Bisturiul cu laser cu CO_2 (I.F.T.A.R.).

serul. Pulsul laser de numai 100 μs durează atît de puţin, încît ochiul nu trebuie imobilizat.

Laseri de putere mare, cum ar fi cel cu bioxid de carbon, sînt folosiţi în chirurgie. Bisturiul cu laser

este folosit la îndepărtarea unor tumori. El are avantajul că este perfect steril şi poate cauteriza instantaneu rana.

În stomatologie s-au făcut, de asemenea, încercări de utilizare a laserului cu CO_2 în găurirea dinţilor. Avantajul net constă în eliminarea zgomotului neplăcut şi al vibraţiilor.

În mod indirect laserii sînt folosiţi în identificarea celulelor canceroase (prin metode holografice de identificare), la măsurarea caracteristicilor de coagulare a sîngelui, la supravegherea bolnavilor.

Supravegherea se face utilizînd circuite de televiziune cu circuit închis. Comunicaţiile se fac pe purtătoare laser, ceea ce garantează o mult mai mare siguranţă în funcţionare în condiţiile în care cablurile obişnuite sînt influenţate de multitudinea de circuite înconjurătoare.

4.4. Holografia

Deşi nu cea mai importantă, holografia este cea mai spectaculoasă aplicaţie a laserilor. După cum îi spune şi numele — „holos“ = total, „graphos“ = înregistrare — holografia este o metodă de a înregistra complet o undă luminoasă. Lumina este în general caracterizată de două mărimi: amplitudine şi fază. Amplitudinea ridicată la puterea a doua ne dă intensitatea undei şi marea majoritate a detectorilor de lumină sînt detectori pătratici, adică sînt sensibili la intensitate şi nu la amplitudine. Faza undei luminoase este o mărime care fixează momentul de începere a oscilaţiei luminoase. Pentru o undă luminoasă, care pleacă de la o sursă punctiformă S, (figura 47) şi ajunge pe două obiecte O_1 şi O_2 aflate la distanţe diferite de S, diferenţa de fază faţă de observatorul O este proporţională cu diferenţa de drum între cele două parcursuri SO_1O şi

SO_2O. Amplitudinile celor două unde care vin de la obiectele O_1 și O_2 depind de gradul de a reflecta al acestora și de forma lor. Rezultă că în timp ce amplitudinea undei ne dă intensitatea recepționată de ob-

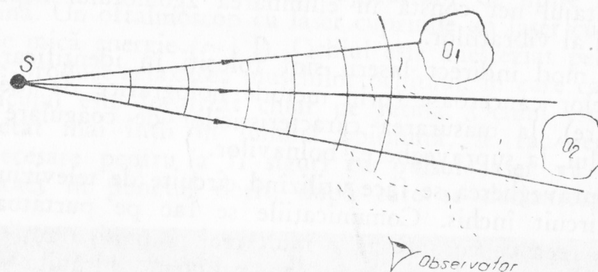


Fig. 47. Diferența de fază și efectul de presiune.

servator, faza undei indică profunzimea scenei vizate. Faza este deci legată de caracterul spațial al scenei pe care o observăm. Fotografia obișnuită nu înregistrează decît intensitatea undei luminoase care vine de la obiect, informația de fază fiind pierdută. Se pierde deci a treia dimensiune a scenei, spațialitatea sau profunzimea. Se pierde și paralaxa scenei, adică schimbarea scenei vizate cînd se schimbă unghiul de observare.

Este evidentă acum semnificația de înregistrare totală a hologramei. Metoda holografică înregistrează „totul“ despre o scenă, adică atît amplitudinea cît și faza undei care vine de la obiect. Cum o hologramă se înregistrează tot pe o placă fotografică, deci pe un detector care nu poate sesiza faza undei, ci numai intensitatea ei, trebuie găsit un fenomen prin care informația de fază să fie transformată în informație de amplitudine.

Fenomenul exista de mult, dar ideea a apărut abia în 1949. Profesorul Denis Gabor — premiul Nobel pentru holografie în 1971 — a avut primul ideea holo-

grafiei, într-o vreme în care realizarea ei practică era mult limitată de lipsa surselor de lumină coerentă.

Gabor a preconizat primul folosirea fenomenului de interferență pentru înregistrarea fazei unei unde lumi-

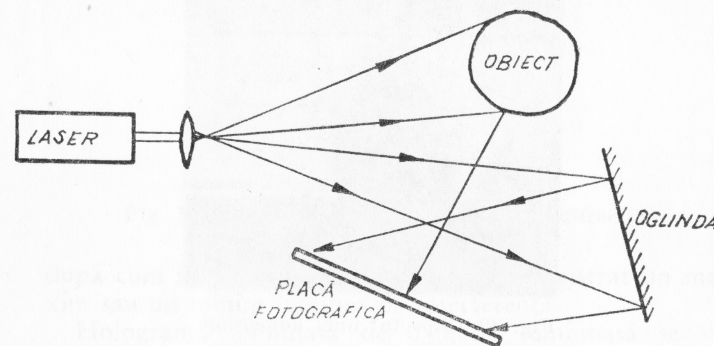


Fig. 48. Înregistrarea unei holograme.

noase. Într-adevăr, forma și numărul franjelor de interferență depind de diferența de fază a celor două unde care interferă, iar vizibilitatea lor de intensitatea celor două fascicule care interferă. Deci pentru a înregistra o hologramă, vom suprapune peste unda luminoasă care vine de la obiect o undă luminoasă de referință (fig. 48). Placa fotografică va înregistra minimele și maximele de interferență rezultate din compunerea celor două unde. Placa fotografică astfel impresionată, developată și fixată se numește hologramă. Între obiect și placa fotografică nu există nici o lentilă, astfel încît pe placă nu apare o imagine a obiectului. Aspectul general al unei holograme este cel din figura 49.

Informația utilă, înregistrată de hologramă, imaginea obiectului, este cuprinsă numai în forma și calitatea franjelor înregistrate pe placa fotografică. Pentru a

pune în evidență imaginea, holograma trebuie citită, decodificată. În etapa de citire a hologramei se folosește fenomenul de difracție a luminii. Difracția este un fenomen caracteristic tuturor undelor și constă în oco-

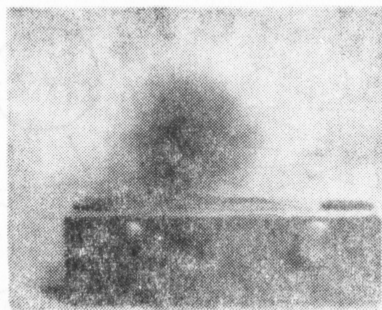


Fig. 49. Aspectul unei holograme.

lirea aparentă a obstacolelor care au mărimi de ordinul lungimii de undă a undei difractate. Astfel, undele radio cu lungimi de undă de zeci de metri pot fi recepționate chiar dacă între antena emițătoare și receptor se află un bloc de locuințe.

Difracția luminii vizibile se produce deci pe obiecte foarte mici, de ordinul fracțiunilor de micron. Un exemplu de difracție am dat și în secțiunea 4.1. O asociere regulată de obiecte difractante este dată de rețeaua de difracție (fig. 50) formată din zone regulate opace alternate cu zone transparente foarte înguste, realizată prin zgîriere pe o sticlă.

Se constată că lumina care cade pe o rețea de difracție este divizată în mai multe fascicule, dintre care cel central este mai intens, iar celelalte scad foarte repede în intensitate. Aceste fascicule se numesc ordine de difracție și se numerotează simetric: —2, —1, 0, +1, +2, . . .

O hologramă este o rețea de difracție neregulată. Într-adevăr, maximele și minimele de interferență apar pe placa fotografică ca zone înnegrite sau transparente,

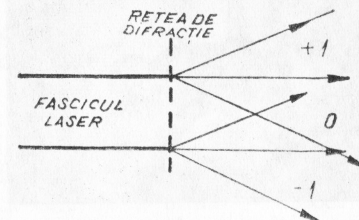


Fig. 50. Difracția luminii pe o rețea de difracție.

după cum în punctul respectiv a fost înregistrat un maxim sau un minim luminos de interferență.

Holograma iluminată de o undă luminoasă se va comporta deci ca o rețea de difracție. Iluminată de

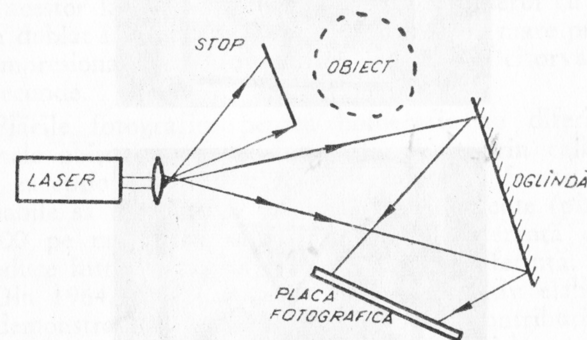


Fig. 51. Citirea unei holograme.

unda de referință (fig. 51) holograma va difracta lumina într-o manieră care depinde de rețeaua de difracție imprimată, deci de forma undei care vine de la







Fig. 52, 53, 54. Fotografii ale unei imagini holografice; aparatul de fotografiat este pus la punct în planuri diferite şi sub unghiuri diferite (I.F.T.A.R.).

obiect. Privind prin hologramă ca printr-o fereastră (figura 51) vom observa imaginea obiectului cu toate atributele de spaţialitate. Ochiul primeşte de la hologramă o undă luminoasă de exact aceeaşi formă ca de la obiectul însuşi. De aici definiţia corectă a holografiei: holografia este o metodă de înregistrare şi redare a undelor luminoase.

În figurile 52, 53 şi 54 sînt prezentate trei fotografii ale unei scene reproduse de o hologramă, astfel încît să poată fi ilustrată profunzimea şi paralaxa unei imagini holografice, caracterul ei spaţial, tridimensional.

Condiţia ca cele două unde — obiect şi de referinţă — să interfere este ca undele să fie coerente. Ele provin de la un acelaşi laser, deci de la o sursă de lumină coerentă. Se folosesc de regulă laserii cu heliu-neon sau laserul cu argon ionizat, pentru obiecte staţionare.

Pentru a realiza holograme ale unor obiecte în mişcare se folosesc laseri pulsaţi care „îngheaţă" mişcarea datorită pulsurilor foarte scurte pe care le emit. Energia acestor laseri — laserul cu rubin sau laserul cu neodim dublat în frecvenţă — este suficient de mare pentru a impresiona placa fotografică în timpul cîtorva nanosecunde.

Plăcile fotografice pentru holografie nu diferă de filmele obişnuite pentru fotografie decît prin calitatea lor excepţională; sînt plăci de granulaţie foarte fină, capabile să înregistreze cele mai mici elemente (pînă la 3 000 pe milimetru) ale figurii de interferenţă ce se produce între fasciculul obiect şi cel de referinţă.

Din 1964, cînd holografia a fost definitiv elaborată şi demonstrată ca metodă practică, prin contribuţia savanţilor americani E. N. Leith şi J. Upatnieks, au apărut numeroase aplicaţii ale holografiei în viaţa practică.

Astfel s-au dezvoltat metode holografice de control nedistructiv, cum ar fi măsurarea deformărilor şi tensiunilor, măsurarea gradului de oboseală al materiale-

lor, măsurarea gradienţilor de temperatură şi presiune, a gradului de corodare, măsurarea parametrilor de curgere în fluide subsonice şi supersonice, măsurarea parametrilor corpurilor în vibraţie etc.

Metoda este generală şi se numeşte interferometrie holografică. Ea constă din a realiza două holograme pe aceeaşi placă fotografică (metoda dublei expuneri). În prima expunere se realizează holograma de referinţă a obiectului în starea sa normală sau iniţială, iar în a doua expunere se realizează holograma obiectului influenţat de perturbaţia de studiat. La citire se obţin două imagini ale obiectului. Cele două imagini, sau fronturi de undă, reconstituite de hologramă, se suprapun. Dacă sînt perfect identice, se suprapun perfect şi interferă constructiv, obţinîndu-se o intensitate luminoasă mai mare în imagine. Dacă obiectul s-a modificat, cele două imagini nu mai coincid perfect. Neconcordanţele apar sub formă de minime şi maxime luminoase, rezultate prin interferenţa celor două imagini. Se pot pune astfel în evidenţă şi măsura cu mare precizie modificări de ordinul fracţiunilor de micron.

O altă variantă a interferometriei holografice — interferometria holografică în timp real — realizează suprapunerea imaginii produsă de hologramă peste obiectul real.

Cînd obiectul este modificat, frontul de undă difuzat de obiect interferă cu frontul de undă reconstituit de hologramă, producînd o distribuţie de franje de interferenţă. În acest caz evoluţia modificărilor poate fi urmărită în mod continuu.

Figura 55 reprezintă fotografia interferogramei holografice a unui obiect comprimat. Dacă obiectul este transparent, lumina care îl traversează sesizează variaţia de grosime a obiectului cînd acesta este solicitat (fig. 56).

În figura 57 franjele de interferenţă sînt corelate cu variaţia de temperatură a gazului dintr-un bec cu fi-

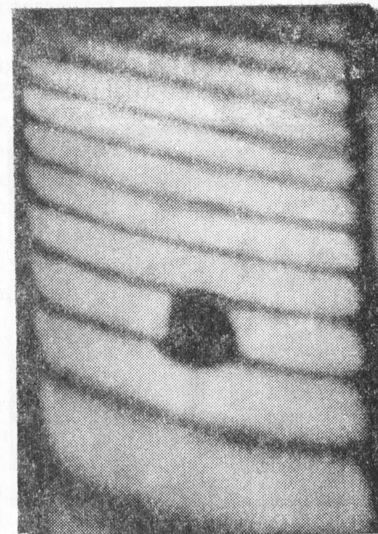


Fig. 55. Interferograma holografică a unui obiect solicitat la flexiune (I.F.T.A.R.).

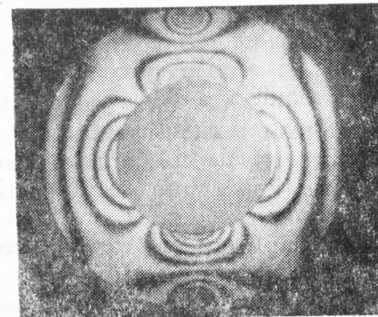


Fig. 56. Franje holografice pentru un obiect transparent comprimat (izopache holografice, I.F.T.A.R.).

lament incandescent. Becul a fost traversat de un fascicul laser care s-a întîlnit pe placa fotografică cu o undă de referință. S-au realizat astfel două holograme — una cu filamentul rece și alta cu filamentul cald — prin

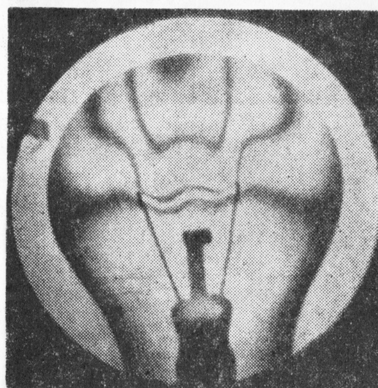


Fig. 57. Gradient termic în jurul filamentului unui bec (I.F.T.A.R.)

sticla becului, care nu împiedică cu nimic observarea fenomenului, deoarece ea nu se modifică între cele două expuneri.

Singurele modificări se referă la indicele de refracție al gazului din bec și acestea sînt puse în evidență de franjele de interferență.

Numărul exemplelor poate fi continuat, metoda este însă pe deplin ilustrată de cele arătate pînă acum.

O altă categorie importantă de aplicații ale holografiei este legată de prelucrarea optică a informației și de calculatoare, aplicații pe care le vom trece pe scurt în revistă în paragraful următor.

Caracterul spațial al înregistrării holografice, alăturat principiilor clasice ale microscopului, a dus la realizarea microscopului holografic. O primă idee în microscopia holografică presupune obținerea unei măriri plecînd chiar de la principiul holografiei. Într-adevăr, dacă o hologramă ar fi înregistrată utilizînd radiații Röntgen (0,05 Å — 5 Å lungime de undă) și ar fi citită cu o rază laser de lumină vizibilă ($\lambda = 5000$ Å) s-ar putea obține o mărire egală cu raportul lungimilor de undă, deci de 1 000—100 000 ori.

Distorsiunile produse de această operație sînt însă foarte mari. De aceea, aplicația practică imediată a holografiei în microscopie este de a face vizibil un volum mare din proba studiată.

La microscoapele obișnuite, cu cît mărirea este mai mare, cu atît profunzimea scenei vizate este mai mică. Capacitatea hologramei de a înregistra în volum, deci cu mare profunzime, permite „memorarea" scenei vizate și studierea ei ulterioară cu un microscop obișnuit prin puneri la punct succesive. Această posibilitate este esențială atunci cînd se studiază probe biologice evolutive, sau alte fenomene variabile în timp.

Lumina laser cu care se realizează holograma este extrem de monocromatică și deci imaginile sînt monocrome. Dacă la înregistrare se folosesc mai mulți laseri de culori diferite, pe placa fotografică se vor înregistra mai multe holograme corespunzătoare fiecărei culori. Imaginea reconstituită de hologramă la iluminarea cu același amestec de culori ca la înregistrare, va apărea colorată.

Iată deci cinematografia tridimensională în culori, subiect intens de cercetare în laboratoarele de holografie.

4.5. Prelucrarea optică a informației și calculatoarele

Posibilitatea de a prelucra date, puse sub o formă convenabilă, prin metode optice, a fost inventată încă în secolul trecut de E. Abbe în 1893 și mai tîrziu, în

1906 de A. B. Porter în cursul unor experimentări de verificare a teoriei microscopului. Experiența Abbe și Porter capătă o rară frumusețe și o mare simplitate cînd sursa de lumină este un laser. Ea stă la baza tuturor schemelor optice de prelucrare optică a datelor.

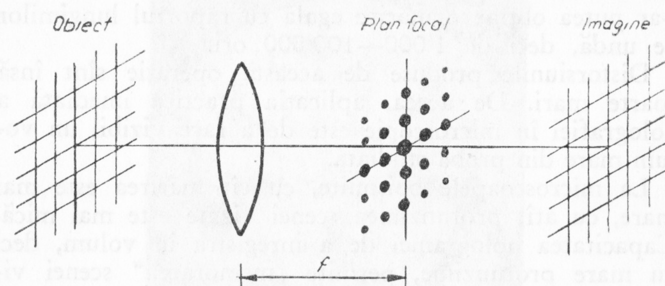


Fig. 58. Schema experienței Abbe și Porter.

În experiența Abbe și Porter un obiect format dintr-o rețea de linii, ca în figura 59 a, este iluminat de o undă de lumină plană, coerentă (figura 58). În planul focal al lentilei se obține o distribuție luminoasă formată din puncte așezate într-o ordine anumită (figura 59 b). Această distribuție luminoasă, aflată în planul focal al lentilei, se numește spectru sau transformată Fourier.

Între cele două distribuții luminoase, obiect și spectru, există o relație matematică bine definită. În continuare, la o distanță dictată de legile opticii geometrice se obține imaginea obiectului. Împiedicînd anumite componente ale spectrului obiectului să ajungă în imagine, vom putea modifica imaginea.

Astfel, dacă vom introduce în planul focal o fantă îngustă, care nu lasă să treacă mai departe decît un singur șir central de puncte orizontale, vom obține în imagine numai rețeaua verticală de linii. Rețeaua de

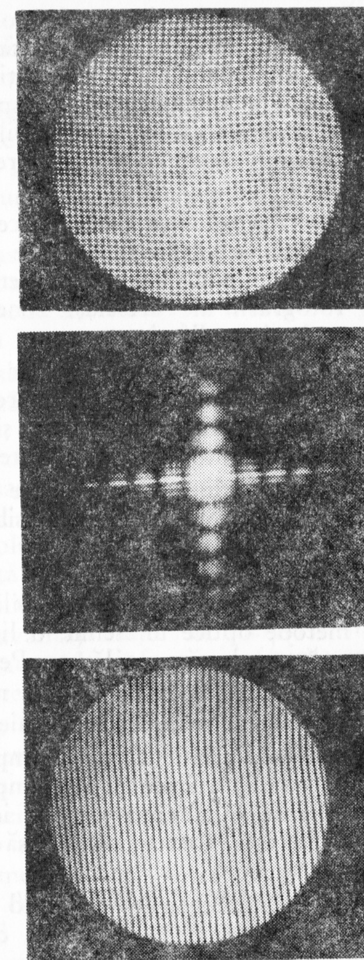


Fig. 59. Obiectul (a), transformata Fourier (b) și rezultatul filtrării (c).

puncte verticală corespunde elementelor orizontale ale obiectului, iar punctele din afara axelor corespund unor elemente înclinate ale obiectului (intersecţiile de linii).

Aceasta este metoda filtrajului optic spaţial. Introducînd în planul Fourier filtre convenabile, diapozitivul obiect din planul obiect poate fi prelucrat după dorinţă.

Se pot astfel efectua operaţii matematice complicate, se pot extrage semnale utile din zgomot, se pot compara fotografii aeriene şi se pot pune în evidenţă diferenţe infime pentru fotografii ale aceleiaşi zone geografice, luate la momente de timp diferite.

Metoda optică de prelucrare a datelor — filtrajul spaţial — este larg utilizată în identificarea bogăţiilor naturale, a zonelor petrolifere subterane şi submarine, prin prelucrarea fotografiilor luate din satelit.

Holografia permite obţinerea unor filtre foarte complicate, prin utilizarea cărora gama de posibilităţi a filtrajului spaţial se extinde foarte mult.

Recunoaşterea semnelor. Există posibilitatea de a identifica prin metode optice un semn, o literă, o semnătură, o amprentă, o adresă poştală etc. Pentru aceasta trebuie făcută o comparaţie între semnul memorat într-o bibliotecă de date şi semnul ce trebuie identificat.

Să considerăm exemplul identificării amprentelor. O amprentă trebuie comparată cu toate amprentele din biblioteca de amprente pînă cînd se face identificarea. În general operaţia este foarte laborioasă şi durează foarte mult.

Operaţia poate fi automatizată folosind următoarea proprietate a unei holograme. Am văzut că un front de undă complicat poate fi generat de o hologramă. Procesul are loc şi în sens invers. Dacă holograma este iluminată exact de unda obiect, atunci se generează

unda de referinţă. Acesta este principiul identificării sau al recunoaşterii.

În practică se realizează o bibliotecă de holograme ale amprentelor, folosind ca obiect diapozitivele transparente ale amprentelor. Amprenta de identificat, tot sub forma unui diapozitiv, este proiectată pe rînd pe hologramele din bibliotecă. În momentul coincidenţei, holograma astfel iluminată va genera o undă luminoasă. Procesul poate fi complet automatizat. Din păcate, pentru moment sistemul este limitat de prezenţa ambiguităţilor în interpretare.

În mod similar se poate realiza un cititor optic de adrese, de cărţi etc., prin identificarea literă cu literă.

Memorii optice. Hologramele pot înmagazina informaţie bi- sau chiar tridimensională. Informaţia poate fi în culori, imagine sau tipăritură. Folosind materiale speciale, holograma poate fi înregistrată sau ştearsă după dorinţă. Informaţia memorată poate fi prelucrată, identificată, separată de zgomote sau de altă informaţie.

Un alt avantaj major al memoriei holografice este timpul de acces la informaţie (microsecunde) şi capacitatea foarte mare.

În figura 60 sînt schematizate principalele elemente ale unei memorii holografice. Fasciculul laser este deflectat de un sistem deflector *x—y*, care permite să ne adresăm unei holograme sau alteia din matricea de holograme. O astfel de matrice poate avea pînă la 1 024 de holograme, fiecare cam de 1 mm în diametru aşezate pe 32 de rînduri şi 32 coloane. Fiecare hologramă, atunci cînd este iluminată, produce un set de spoturi luminoase care sînt detectate de o matrice de detectori. O hologramă de 1 mm poate astfel înmagazina 10 000 unităţi de informaţie, iar o placă fotografică de cîţiva centimetri poate memora milioane de unităţi.

Cînd datele trebuie schimbate, se înregistrează altă hologramă sau se folosesc materiale fotocrome. Aceste materiale au proprietatea că nu necesită operaţii de developare şi fixare şi pot fi şterse cu un fascicul intens de lumină.

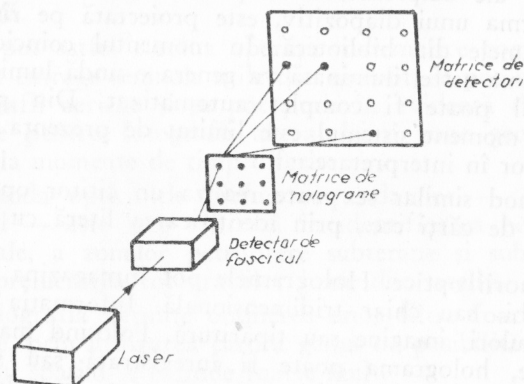


Fig. 60. Elementele unei memorii holografice.

Holograme modelate pe calculator. Există posibilitatea de a obţine imagini ale unor obiecte inexistente? Poate un arhitect să vadă clădirea pe care a imaginat-o, poate un inginer să vadă cum se comportă un element constructiv inexistent, abia imaginat, cum s-ar comporta supus unor probe?

Răspunsul este afirmativ, iar soluţia este oferită de combinaţia calculator-holografie.

Calculatorul poate să calculeze distribuţia luminoasă care trebuie înregistrată pe placa fotografică. Această distribuţie este afişată pe ecranul unui televizor şi fotografiată. Fotografia astfel obţinută este o hologramă, care, iluminată de un fascicul laser, va produce o imagine, fantoma obiectului imaginat.

4.6. Aplicaţiile laserilor în prelucrarea materialelor

Monocromaticitatea şi direcţionalitatea surselor de lumină laser corelate cu intensitatea lor deosebită duc la posibilitatea de a obţine densităţi de energie foarte mari, capabile să topească materialele cele mai greu fuzibile, să sudeze materiale imposibil de sudat prin alte metode, să găurească şi să taie materialele cele mai dure etc.

Radiaţia laser poate fi concentrată pe suprafeţe foarte mici. Pata obţinută în focarul unei lentile bine corectată de aberaţii are un diametru de numai cîţiva microni (fig. 61).

Se obţin astfel densităţi de energie de ordinul 10^6 W/mm^2 pentru laserul cu CO_2 continuu şi 10^{12} W/mm^2 pentru laserul cu sticlă dopată cu neodim, faţă de numai 10^3 W/mm^2 pentru flacăra oxiacetilenică.

Procesele fizice de sudare, găurire, tăiere se desfăşoară în mod diferenţiat.

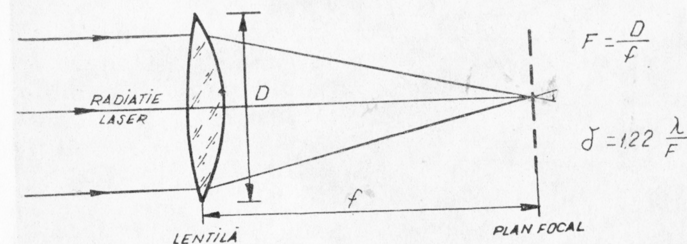


Fig. 61. Concentrarea radiaţiei laser în focarul unei lentile (δ = diametrul petei focale).

Găurirea cu laserul. Laserul realizează găuri în materiale dure prin evaporare. Densitatea enormă de energie ce se obţine în planul focal al lentilei de concen-

trare (fig. 62) produce evaporarea locală a materialului. Încălzirea se produce atît de rapid încît căldura nu are timp să difuzeze în material şi astfel dimensiunile

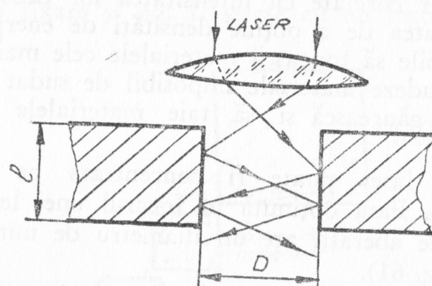


Fig. 62. Desfăşurarea procesului de găurire cu laserul.

găurii se menţin foarte mici (fig. 63). Găuri de ordinul micronilor pot fi date în materialele de cele mai diverse durităţi, inclusiv în rubinele pentru ceasuri. Pentru a

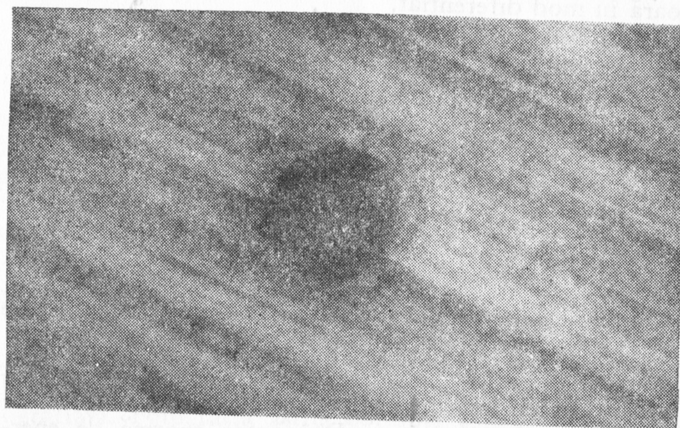


Fig. 63. Fotografia unei găuri de $\simeq 100\ \mu m$, dată într-o placă de oţel cu instalaţia Neodim 10 (I.F.T.A.R.).

localiza foarte precis locul în care urmează să se concentreze fasciculul de raze laser, o instalaţie de microgăurire cu laser cuprinde (fig. 64) un sistem optic de

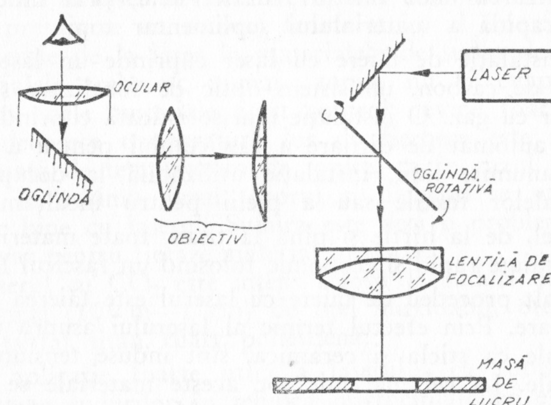


Fig. 64. Schema unei instalaţii de microgăurire cu laser.

vizare şi punere la punct, vizarea făcîndu-se chiar prin lentila de focalizare. De regulă se lucrează cu laseri în regim de impulsuri cum sînt laserul cu rubin sau laserul cu sticlă dopată cu neodim.

Tăierea cu laserul. Pentru tăiere se folosesc laseri care emit continuu. Cînd materialele supuse operaţiei de tăiere sînt foarte dure se foloseşte suflarea cu oxigen. Viteza de tăiere a metalelor creşte mult cînd se suflă oxigen. În cazul metalelor neferoase, prin suflarea cu oxigen se formează oxizi care au o reflectivitate mai redusă decît metalul pur şi deci radiaţia laser este mai bine absorbită. În cazul metalelor fieroase, la suflarea cu oxigen se produc reacţii exoterme, care conduc de asemenea la ridicarea temperaturii. Cînd materialele

de tăiat sînt inflamabile se suflă bioxid de carbon sau azot pentru a împiedica aprinderea.

În general suflarea unui gaz în zona de tăiere duce la realizarea unor tăieturi curate, nete, prin îndepărtarea rapidă a materialului suplimentar topit.

O instalație de tăiere cu laser cuprinde un laser cu bioxid de carbon, un sistem optic de focalizare și un suflător cu gaz. O instalație mai sofisticată cuprinde un sistem automat de dirijare a fasciculului pentru a tăia după anumite linii, instalație utilizabilă la decuparea materialelor textile sau a pielii pentru încălțăminte.

Astfel, de la hîrtie și pînă la titan, toate materialele pot fi tăiate rapid și economic folosind un fascicul laser.

Un alt procedeu de tăiere cu laserul este tăierea prin tensionare. Prin efectul termic al laserului asupra unor materiale ca sticla și ceramica, sînt induse tensiuni în materiale. La cel mai mic șoc aceste materiale se rup în lungul direcțiilor de tensionare. Metoda este folosită cu succes la tăierea plăcuțelor de siliciu în industria electronică. Se folosesc laserii cu CO_2 sau cu YAG de puteri relativ mici.

O altă aplicație mult răspîndită în industria electronică este trimerizarea sau corectarea valorilor rezistențelor. Metodele de producere a rezistențelor prin depunerea unor straturi subțiri rezistive dau abateri mari de la valoarea dorită. De aceea se preferă realizarea unor valori supranominale și trimerizarea sau ajustarea ulterioară prin îndepărtarea stratului rezistiv suplimentar. Există foarte multe sisteme cu laseri, mai mult sau mai puțin complicate, cuprinzînd laseri cu argon, neon, neodim sau CO_2.

Precizia de trimerizare cu laseri este foarte bună, metoda este curată și foarte bine controlabilă. Se ajunge astfel al o trimerizare în limitele a 0,01% din valoarea rezistenței.

Procesul de trimerizare implică uneori tăieri, alteori vaporizare, dar puteri mici ale radiației laser incidente.

Sudura în fascicul laser. Realizarea unei suduri cu laserul presupune un control foarte strict al transferului de energie de la laser la materialele de sudat deoarece materialele trebuiesc numai topite nu și evaporate. Pentru unele materiale acest control devine foarte dificil deoarece temperatura lor de fierbere este foarte apropiată de temperatura de topire, ca în cazul tantalului. În schimb aurul, cuprul și nichelul se sudează foarte bine cu laserul. Sudura este deci o problemă de rezolvat pentru fiecare material în parte.

Laserul cu CO_2 este intens folosit la suduri de grosimi mici ($10\mu m$—1 cm) de oțel inoxidabil, oțel carbon, tantal, titan, cuarț, polietilenă.

O aplicație foarte utilă a laserului cu rubin este realizarea sudurilor în tehnica microcircuitelor electronice. Această metodă nu afectează cu nimic zonele adiacente, sudura este foarte mică, sigură și curată. Un impuls laser este suficient pentru a suda sîrmele de aur de numai 10—100 μm, utilizate curent în industria de microcircuite.

4.7. Aplicații în știință

Grupăm sub acest titlu cîteva aplicații foarte importante ale laserilor pentru dezvoltarea viitoare a științei și tehnicii, aplicații legate de obținerea reacțiilor termonucleare controlate, separări izotopice cu laser, optică neliniară.

Separări izotopice cu laserul. Una dintre cele mai pline de promisiuni aplicații ale laserului este îmbogățirea uraniului natural folosind o tehnică laser. Moti-

vele economice sînt evidente. Ideea de bază a procesului de îmbogățire izotopică a uraniului constă în utilizarea monocromaticității extraordinare a laserului pentru a selecta și separa izotopii.*

Uraniul natural are trei izotopi $^{234}_{92}U$ $^{235}_{92}U$ și $^{238}_{92}U$ dintre care numai $^{235}_{92}U$ este fisionabil, deci utilizabil în energetica nucleară. În stare naturală, uraniul este un amestec de izotopi în proporția 0,17% ^{235}U, 99,28% ^{238}U și 0,005% ^{234}U. Creșterea ^{235}U chiar și cu un procent în amestecul combustibil este astfel extrem de importantă. Operația de îmbogățire, așa cum se face astăzi, este lentă și extrem de costisitoare.

Procedeul de separare cu laser exploatează micile diferențe dintre nivelele energetice ale izotopilor. În acest scop, frecvența laserului trebuie să se încadreze exact în intervalul energetic a două nivele de energie ale izotopului 235, pentru ca numai acesta să fie excitat și deci să treacă pe un nivel energetic superior.

Cum nivelele de energie ale izotopilor sînt extrem de apropiate, nici o altă sursă luminoasă, în afară de laser, nu este suficient de monocromatică pentru a excita numai un izotop.

În acest fel, se realizează marcarea izotopilor de uraniu 235. Separarea se face ulterior prin alte procese fizice ce acționează numai asupra izotopilor excitați.

Pentru ca întregul proces să fie posibil este deci nevoie ca nivelele energetice ale izotopilor să fie bine definite, laserul să fie foarte monocromatic și acordabil cu precizie pe frecvența necesară, iar procesul de separare să acționeze numai asupra atomilor excitați.

* Izotop (ISOS = același, TOPOS = loc) — atomi ai aceluiași element, care ocupă același loc în tabelul lui Mendeleev, dar au mase atomice diferite. Uraniul ocupă locul 92 în tabelul lui Mendeleev și are trei izotopi, de masă 234, 235 și 238 unități atomice de masă; 1 u.a.m. este egală cu 1, 66 · 10^{-27} kg.

O schemă de funcționare a procesului este reprezentată în figura 65. Un foton laser, de energie $h\nu_1$, acționează riguros numai asupra izotopului A și lasă neafectat izotopul B. Obținem astfel atomi ai izotopului A

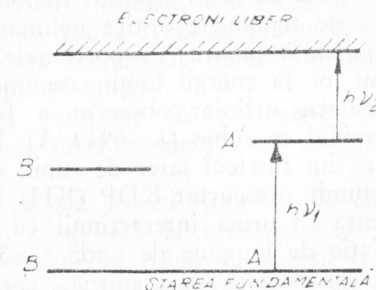


Fig. 65. Nivelele energetice ale izotopilor A și B.

în starea excitată A'. Dacă, în continuare, cu alt laser se furnizează atomilor A' o energie $h\nu_2$, suficientă ionizării lor, se obțin ioni ai atomului A. În incinta de lucru se vor obține deci ioni ai izotopului A și izotopi neutri B. Un cîmp electric poate separa acum atomii ionizați de cei neutri și procesul este încheiat.

Optică neliniară. Concentrarea foarte mare de energie, în timp și spațiu, care se obține cu ajutorul laserilor, a pus în evidență fenomene de interacție lumină-substanță, cu totul noi și surprinzătoare.

Cînd un fascicul de lumină cade pe un material oarecare, are loc o schimbare în distribuția atomilor materialului, o interacțiune. La nivele de energie mici această interacțiune este liniară, adică perturbația crește direct proporțional cu amplitudinea. La energii foarte mari apar efecte noi. Schimbările în distribuția și alinierea atomilor nu mai sînt proporționale cu energia fascicu-

lului incident, ci cu pătratul sau puterea a treia a energiei. Schimbarea distribuţiei atomilor în material influenţează lumina perturbatoare, existînd posibilitatea de a obţine noi linii laser în urma unei astfel de interacţiuni. Fenomenele de acest tip sînt înglobate în denumirea comună de fenomene optice neliniare, spre deosebire de fenomenele liniare (proporţionale cu amplitudinea) care au loc la energii luminoase mici.

Primul fenomen neliniar observat a fost dublarea frecvenţei laserului cu rubin ($\lambda=6943$ Å). Încă în 1961 s-a observat că un fascicul laser de rubin care cade pe un cristal denumit prescurtat KDP ($KH_2 PO_4$) îşi dublează frecvenţa în urma interacţiunii cu cristalul. Se obţine o radiaţie de lungime de undă $\lambda=3472$ Å. Radiaţia astfel obţinută este, de asemenea, coerentă, direcţionată şi monocromatică. Este deci tot o radiaţie laser. Iată deci o metodă de a multiplica sursele de lumină laser.

O altă metodă de a obţine surse coerente este utilizarea efectului Raman. Efectul propriu-zis este cunoscut din 1928 şi a fost descoperit de Chandraseckhara Venkata Raman. Raman a observat că în lumina difuzată de anumite substanţe apar frecvenţe luminoase care nu erau prezente în lumina incidentă. Astfel, dacă o cuvă cu benzen este iluminată de o lampă cu mercur, în lumina împrăştiată de benzen apare o frecvenţă nouă mai mică decît a mercurului şi alta mai mare, dar la acelaşi interval. Frecvenţa mai mică (lungimea de undă mai mare) apare atunci cînd fotonii incidenţi ridică molecula benzenului pe un nivel de energie superior, consumîndu-şi astfel o parte din energie. În acest mod, ţinînd cont de relaţia lui Plank, fotonii împrăştiaţi vor avea o frecvenţă mai mică. O parte din fotoni vor întîlni însă molecule excitate. Prin dezexcitarea moleculelor, energia fotonilor creşte, deci şi frecvenţa lor creşte. Desigur posibilitatea de a întîlni molecule excitate este mică şi, din acest motiv, liniile Raman de frecvenţe mai mari sînt mai puţin intense decît liniile Raman de frecvenţă mai mică decît a luminii incidente.

Cînd lumina incidentă este lumină laser, liniile Raman vor fi foarte intense. Dacă celula cu benzen este introdusă în cavitatea rezonantă a unui laser cu rubin, acesta va emite coerent nu numai lumina roşie a rubinului ci şi liniile Raman.

În aceeaşi categorie de fenomene noi, de optică neliniară, mai intră absorbţia de doi fotoni şi autofocalizarea.

Absorbţia a doi fotoni simultan de către un singur atom a fost observată la interacţiunea luminii foarte intense a laserului cu rubin cu atomii cesiului în stare de vapori. Fotonii laserului cu rubin au o energie care nu corespunde diferenţei între oricare două nivele de energie ale atomului de cesiu. Dar aceşti atomi aveau un nivel de energie care corespundea exact energiei a doi fotoni de lumină laser. Dacă fasciculul laser este destul de intens, un mare număr de atomi de cesiu vor absorbi simultan cîte doi fotoni şi absorbţia va putea fi pusă în evidenţă.

Autofocalizarea este un fenomen prin care un fascicul laser foarte intens, ce se propagă printr-un material uniform şi transparent, se focalizează ca şi cum

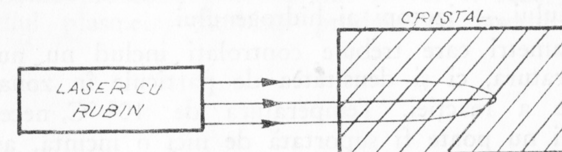


Fig. 66. Autofocalizarea fasciculului laser.

ar trece printr-o lentilă (fig. 66). În realitate se obţine un efect de lentilă: materialul se comportă diferit pentru intensităţi diferite şi cum fasciculul laser este mai

intens la mijloc decît la margini, indicele de refracţie al materialului diferă pe secţiunea transversală a fasciculului. Această variaţie a indicelui de refracţie produce un efect de lentilă.

Fenomenul de autofocalizare este deosebit de periculos în tehnica laser, deoarece poate produce distrugerea componentelor optice pe care fasciculul laser le traversează.

Rolul laserului în fuziunea nucleară. Energia nucleară se poate obţine atît prin fisiune, adică prin scindarea unui nucleu greu în două nuclee medii, cît şi prin fuziunea nucleelor uşoare de la începutul tabelului periodic al elementelor. Reacţiile de fuziune constituie o sursă practic inepuizabilă de energie, deoarece materia primă este apa. Pentru declanşarea unei reacţii termonucleare este nevoie de o temperatură foarte ridicată, de unde şi numele de reacţie termonucleară. Pînă acum s-au obţinut explozii termonucleare, în care caz ridicarea temperaturii se face printr-o explozie nucleară de fisiune. Obţinerea reacţiei termonucleare controlate ar rezolva necesităţile de energie ale omenirii şi acesta este motivul pentru care se fac mari eforturi pe multiple direcţii pentru rezolvarea problemei. Se pun mari speranţe în obţinerea fuziunii controlate a deuteriului şi tritiului — izotopi ai hidrogenului.

Parametri care trebuie controlaţi includ nu numai temperatura, ci şi densitatea de particule în zona de iniţiere a reacţiei. Temperatura de 10^8 °C, necesară reacţiei nu poate fi suportată de nici o incintă, astfel că materialul sub formă de plasmă este ţinut de cîmpuri magnetice intense, departe de pereţii incintei. Materialul fuzionabil — deuteriul sau amestec de deuteriu şi tritiu — trebuie deci încălzit şi menţinut un timp suficient de lung la o temperatură enormă.

Se pare că laserul poate să facă atît ridicarea temperaturii picăturii de material fuzionabil cît şi menţinerea densităţii mari de particule a plasmei*, fără confinare exterioară.

Ideea de bază pentru a realiza fuziunea cu laserul este de a încălzi o ţintă de D—T, iniţial îngheţată, prin absorbţia radiaţiei laser, într-un timp foarte scurt.

În prezent se experimentează folosirea mai multor fascicule laser, dispuse simetric şi focalizate în acelaşi punct. Se creează posibilitatea de a concentra o densitate mai mare de energie în regiunea ţintei şi de a o iradia uniform şi simetric, obţinîndu-se o plasmă aproape sferică. Evaporarea suprafeţei ţintei se produce atît de rapid încît gazele de la suprafaţa picăturii sînt aruncate cu mare viteză în afară şi prin reacţie se produce o forţă care acţionează în sens invers. Apare astfel o presiune enormă, care acţionează asupra miezului picăturii şi îl comprimă de 10^3—10^4 ori.

În acest fel se pare că laserul poate rezolva toate problemele fuziunii nucleare.

Energiile obţinute pînă acum nu sînt însă suficiente. E nevoie ca energia laserilor pulsaţi să crească de la 10 kJ, obţinuţi în prezent, pînă la 300 kJ, lucru estimat ca posibil în următorii 10 ani. Pînă atunci o gamă largă de probleme practice sînt şi vor fi rezolvate în studiul plasmelor fierbinţi produse cu laserul.

* Plasma este materia în stare de nuclee şi electroni separaţi.

5. LASERII ÎN ȚARA NOASTRĂ

Cercetările privind laserii și aplicațiile lor au fost abordate la noi în țară în Institutul de fizică atomică și continuate astăzi pe platforma fizicii românești în noul cadru al Institutului de fizica și tehnologia aparatelor cu radiații (I.F.T.A.R.). Aceste cercetări au fost inițiate în cadrul fostului laborator de metode optice în fizica nucleului, care prin anii '60 se ocupa de spectroscopie de mare rezoluție, descărcări în gaze și depuneri în vid. Ca preocupări, laboratorul se afla foarte aproape de cercetările specifice laserilor. Iată de ce, în toamna anului 1962, țara noastră și-a înscris numele printre primele țări din lume care au obținut lumină coerentă.

Sub conducerea profesorului Ioan Agârbiceanu, cercetătorii români realizează prin eforturi proprii un laser cu heliu și neon capabil să emită lumină laser infraroșie ($\lambda=1{,}15$ μm). Nu după multă vreme s-a obținut emisie stimulată pentru același tip de laser la alte două lungimi de undă: 3,39 μm și 6328 Å.

O a doua premieră în evoluția cercetărilor de laseri din România a constituit-o construcția laserului cu CO_2 de mare putere în anul 1967 (100 W în emisie continuă).

Un loc deosebit în dezvoltarea laserilor românești îl ocupă și laserii cu gaze nobile ionizate. Primul model cercetat și construit în 1967 a fost un laser cu argon ionizat cu funcționare în impuls și cvasicontinuu.

În domeniul laserilor cu mediu activ solid, primul laser a fost pus în funcțiune în Institutul de fizică atomică în 1968, obținîndu-se emisie stimulată la 1,06 μm în regim pulsat, într-o bară de sticlă dopată cu neodim.

În momentul de față, în Secția de cercetare și inginerie tehnologică laseri și instalații cu laseri se desfășoară cercetări complexe privind diversificarea tipurilor de laseri, ridicarea parametrilor funcționali ai laserilor existenți și mărirea numărului de aplicații ale laserilor în cele mai diverse domenii de activitate.

Datorită proprietăților sale specifice (emisie continuă, în vizibil, coerență și direcționalitate ridicate, siguranță în funcționare, preț scăzut), laserul cu He-Ne s-a impus într-o serie de aplicații ca: alinieri, holografie, interferometrie. În cei 15 ani de cercetări științifice și tehnologice s-au realizat diverse tipuri de laseri cu He-Ne și instalații cu astfel de laseri.

În figura 67 este prezentat ultimul laser cu He-Ne, modelul LG-10 de 10 mW, destinat experiențelor de holografie și interferometrie. În direcția obținerii de laseri cu He-Ne cu performanțe îmbunătățite, menționăm recenta realizare a unui tub laser ce emite 60 mW în structura modală cea mai simplă TEM_{00q}, la o lungime a tubului de 250 cm.

O performanță deosebită în domeniul laserilor cu He-Ne este laserul stabilizat în frecvență, cu puterea de 0,4 mW monofrecvență, cu o lungime de coerență mai bună de 10 m (fig. 36). Asemenea performanțe au fost obținute printr-o construcție mecanică deosebit de stabilă la vibrații și dilatări și o schemă electronică de reglaj automat a lungimii cavității rezonante.

În domeniul laserilor moleculari, studiile efectuate au dus la realizarea unei game diversificate de laseri cu CO_2 ce acoperă un domeniu larg de aplicaţii. Aceste

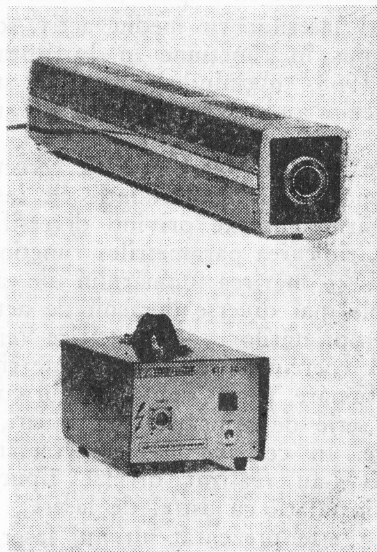


Fig. 67. Laser cu He-Ne de 10 mW şi a sursei de alimentare.

tipuri emit puteri între 100 W şi 500 W în continuu şi 1—100 J în regim de impulsuri, sau puteri de cîţiva waţi pentru modelul stabilizat în frecvenţă.

Un laser cu CO_2 de 300 W este prezentat în figura 68. Pentru aplicaţii de spectroscopie, holografie şi comunicaţii s-au construit laseri cu argon sau kripton ionizat cu emisie continuă sau în impuls. Puterile obţinute sînt în domeniul 0,5 W — 3 W pentru laserul cu argon şi 0,5 W pentru cel cu kripton care emite în roşu.

Amintim, de asemenea, laserul cu azot ($\lambda=0,337$ μm), capabil să emită 1 MW în pulsuri de circa 10 ns şi laserul cu heliu-cadmiu, care emite în albastru

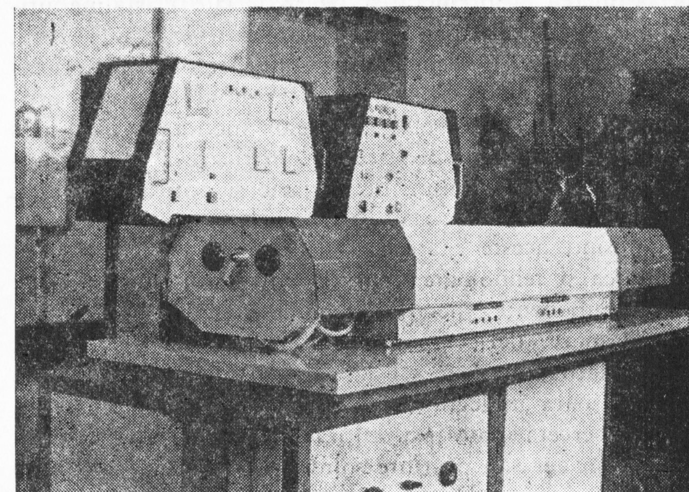


Fig. 68. Laser cu CO_2 de 300 W.

($\lambda=0,442$ μm) şi ultraviolet ($\lambda=0,325$ μm) puteri de zeci de mW, în continuu.

Dintre laserii cu mediu activ lichid a fost abordat laserul cu coloranţi organici pompat fotonic (fig. 26), care emite în prezent zeci de mJ în impulsuri de aproximativ 1 μs.

Laserii cu rubin şi sticlă dopată cu neodim sînt construiţi, de asemenea, în mai multe variante cu puteri de 10—20 MW. În prezent se lucrează la un sistem laser cu amplificator de foarte mare energie pentru creare de plasmă foarte fierbinte.

Este important de subliniat că multe componente și tehnologii specifice laserilor sînt realizate în țară și reprezintă contribuții românești originale. Ne referim la obținerea și prelucrarea de materiale cristaline utilizabile ca detectoare sau modulatoare (Ge, NaCl, KCl, KDP, ADP etc.), medii active solide amorfe sau cristaline (sticlă cu Nd, YAG cu Nd, rubin etc.), cu proprietăți optice la nivelul cerințelor mondiale. S-au pus la punct tehnologii specifice de purificare a gazelor nobile, de tehnica vidului, de sticlărie și optică, de depuneri în vid etc.

Folosind aceste materiale și tehnologii în Institutul de fizica și tehnologia aparatelor cu radiații se produc atît componente specifice tehnicilor laser — oglinzi, modulatoare, deflectoare de fascicul, polarizori — cît și instalații complexe cu laseri. Cercetări de amploare se desfășoară în legătură cu plasma produsă cu laserul. Aceste cercetări au fost inițiate în 1970. S-au obținut plasme în aer sau pe ținte solide. S-au obținut rezultate interesante privind pragul de străpungere dielectrică în cîmp intens laser în aer și în alte gaze, cu fascicule de laseri cu Nd și CO_2 în impulsuri. De asemenea, s-a studiat influența vecinătății unei ținte metalice asupra pragului de străpungere în gaze. Rezultatele s-au valorificat prin construirea unei instalații de declanșare simultană a mai multor generatoare de foarte înaltă tensiune, prin ionizarea cu laserul a aerului dintre electrozi.

În domeniul opticii neliniare, cercetările vizează în primul rînd dublarea de frecvență și obținerea de pulsuri ultrascurte de ordinul nanosecundelor și picosecundelor.

Cercetări moderne de holografie vizează interferometria holografică, calculul optic și memoriile holografice.

Cea mai mare parte dintre cercetările privind laserii se finalizează prin aplicații industriale necesare economiei naționale sau altor domenii ale vieții sociale.

Am amintit deja realizările românești în operațiile de aliniere cu laseri. Asemenea dispozitive cu laser funcționează la șantierele hidrocentralelor de pe Lotru, la Șantierul tunelului de cale ferată Beia (Brașov), la coșul de fum al termocentralei Turceni, pentru alinieri în construcții-montaj, la șantierul metroului din București sau la lucrările de terasări în agricultură.

Interferometrul cu laser, capabil să măsoare între 0 și 5 m cu precizia de 0,1 µm, funcționează la Fabrica de mașini unelte și agregate București.

Una dintre primele instalații cu laser realizată în țară a fost instalația pentru prelucrarea optică a datelor rezultate din prospecțiuni seismice, care funcționează la Institutul de prospecțiuni geologice și geofizice București, urmată astăzi de instalația de calcul optic CORAL-1, capabilă să execute operații matematice ca derivarea și integrarea.

Instalația de microprelucrări (găuriri și suduri) cu laser cu sticlă cu neodim funcționează din 1975. Instalația găurește materiale dure și greu fuzibile (oțel de scule, vidia, diamant) producînd orificii cu diametre între 5 µm — 0,8 mm pe grosimi de material pînă la 4 mm și microsuduri prin puncte pe adîncimi de 10µ — 0,3 mm. Instalația este semiautomată.

În acest an se va realiza oftalmoscopul cu laser cu rubin, utilizabil pentru lipiri de retină.

Laserii cu CO_2 echipează instalații cu laser pentru trimerizare, confecționare de circuite integrate etc.

Cercetările de interferometrie holografică s-au finalizat cu instalații IH-1 și IH-2 destinate unor măsurători industriale de mare precizie.

Se pot evidenţia microdeplasări ale unor componente mecanice, deformări, vibraţii etc. Instalaţia IH-2 este utilizată la studiul distribuţiilor de indice de refracţie în gaze, lichide şi solide transparente, la testarea componentelor optice şi fotoelasticitate holografică.

Cercetările de diversificare a laserilor, de îmbunătăţire a parametrilor lor şi de extindere a domeniilor de aplicaţie sînt în plină desfăşurare.

CUPRINS